

高レベル放射性廃棄物地層処分における
閉鎖性能に関する検討
(平成14年度)
(研究報告)

2003年4月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス：029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

高レベル放射性廃棄物地層処分における閉鎖性能に関する検討

(平成 14 年度)

(研究報告)

杉田 裕* , 川上 進* , 油井三和* , 牧野仁史** ,
澤田 淳** , 栗原雄二** , 三原守弘***

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分における地下施設の閉鎖技術に関して、第 2 次取りまとめでは人工バリアの設置環境に有意な影響を与えないように処置する技術として概念検討を行った。また、安全評価においては、評価上はそのバリア性能を無視して(機能を期待しないこととして)処分システムを評価した。

第 2 次取りまとめ以降、プラグや埋め戻しといった閉鎖要素の地下環境での機能に関するデータが取得されてきたことを受け、具体的な閉鎖要素の機能を考慮した処分技術と安全評価の両者の観点からの閉鎖性能の評価が必要であると考えた。

そこで、閉鎖に関わる岩盤特性、閉鎖要素機能を整理し、断層破碎帯と処分パネル間の水理解析、fault ツリー解析等に基づいて第 1 次案としての閉鎖性能シナリオを構築した。

* 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

** 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

*** 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分材料研究グループ

A Study on Closure Performance in Geological Disposal
of High-level Radioactive Waste (H14)
(Research Document)

Yutaka SUGITA*, Susumu KAWAKAMI*, Mikazu YUI*, Hitoshi MAKINO**,
Atsushi SAWADA**, Yuji KURIHARA** and Morihiro MIHARA***

Abstract

Regarding closure technology of underground facilities in geological disposal of the HLW in H12 report, the fundamental concept that closure technology has no impact against the engineered barrier system (EBS) was described. Performance Assessment (PA) has been performed without considering of the barrier function of closure elements.

Following H12 report, the various in-situ data of the closure elements (ex. plug, backfill) have been obtained. Therefore, we considered that the PA of the EBS considering the expecting performance of the closure elements from the view points of both the engineering technology and the PA should be examined

First, the characteristics of rock mass and the function of the closure elements were summarized. Then, the closure scenario was developed preliminarily based on hydrological analysis between a hydraulic fracture and a disposal panel, the fault tree analysis, and so on.

* Barrier performance group, Waste isolation research division,
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works

** System analysis group, Waste isolation research division,
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works

*** Material analysis group, Waste isolation research division,
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works

目 次

1. はじめに	1
2. 国際ワークショップの議論内容	3
3. 閉鎖要素の機能およびその喪失の影響	5
3.1 埋め戻し材	6
3.2 止水プラグ	8
4. 掘削影響領域の評価	13
4.1 掘削影響領域の水理特性	14
4.2 支保工の劣化	15
5. 坑道沿いの流れに関する水理解析	18
5.1 亀裂ネットワークモデルによる解析	20
5.2 均質二次元平面モデルによる解析	22
6. 閉鎖性能に関する安全評価シナリオ	27
6.1 Fault ツリー	28
6.2 安全評価に関する閉鎖シナリオ	32
7. 今後の検討課題	34
8. おわりに	35
謝辞	35
参考文献	36

表 目 次

表-3.1	破碎帯の頻度モデル	8
表-5.1	閉鎖性能にかかわる評価の比較	18
表-6.1	閉鎖性能に関わる因子の評価の比較	27
表-6.2	Fault ツリーダイアグラムの評価結果	31

図 目 次

図-1.1	閉鎖性能に関わる因子（処分パネル-破碎帯間）	1
図-3.1	第 2 次取りまとめにおける閉鎖概念	5
図-3.2	Backfill and Plug 試験の断面図	7
図-3.3	亀裂トレース長の累積頻度分布	8
図-3.4	止水プラグの設置状況	9
図-3.5	トンネルシーリング性能試験の模式図	10
図-3.6	粘土プラグの設計	11
図-3.7	粘土プラグの浸潤の経時変化	11
図-3.8	両プラグ下流側での湧水量の経時変化	12
図-4.1	処分パネル-破碎帯間の移行経路	13
図-4.2	セメント系材料の透水係数の例	15
図-4.3	コンクリート支保の厚さとベントナイトの溶解率との関係	16
図-4.4	坑道の断面	17
図-5.1	水理解析の概念	19
図-5.2	第 2 次取りまとめレファレンスで設定された処分坑道と追加した連絡坑道	20
図-5.3	水平断面における水頭分布(1 リアライゼーションの結果)	21
図-5.4	処分坑道（200m 全体）および連絡坑道を通過する流量	21
図-5.5	均質二次元平面モデル	22
図-5.6	均質二次元平面モデルの連絡坑道を追加したケースにおける水頭分布	23
図-5.7	均質二次元平面モデルの処分坑道および連絡坑道を通過する流量	23
図-5.8	均質二次元平面モデルを用いた解析結果（水頭分布）	24
図-5.9	均質二次元平面モデルの処分坑道および連絡坑道を通過する流量	25
図-5.10	各坑道を通過する流量の比較	26
図-6.1	閉鎖性能に関わる fault ツリー	30
図-6.2	閉鎖シナリオ構築のための fault ツリーの分析結果	33

道からそれを横切る破砕帯を経由するケース，立坑を経由するケース，主要坑道からそれを横切る破砕帯を経由するケース，処分坑道からそれを横切る破砕帯を経由するケース，地表から地下深部に打たれたボーリング孔を経由するケース等が考えられる。本報告書では，これら考えられるケースの中から，各因子の閉鎖能力が十分でなかった場合として，連絡坑道からそれを横切る破砕帯を経由するケース（図-1.1 参照）を対象とした検討を行った。

連絡坑道からそれを横切る破砕帯を経由するケースで処分パネル-破砕帯間の閉鎖性能に影響を与える因子は，図-1.1 に示すように，坑道周辺岩盤（掘削影響領域を含む）における連続的な移行経路の発生，破砕帯の連絡坑道との交差，コンクリート支保工の設置された坑道における支保工の劣化による連続的な移行経路の発生，坑道を埋め戻す埋め戻し材の止水性能，止水プラグの止水性能である。

本報告書では，まず，これらの因子の特性についての理解度を整理し，引き続き破砕帯と処分パネル間の水理解析，Fault ツリー解析等の検討を行い，第 1 次案としての閉鎖性能シナリオを構築した。

本報告書では，2 章において国際ワークショップの議論内容，3 章で閉鎖要素，4 章で掘削影響領域の評価について示す。5 章では坑道沿いの流れに関する水理解析結果について示し，6 章でこれらの結果に基づき検討した閉鎖性能シナリオ，7 章に今後の検討課題を示す。

2. 国際ワークショップの議論内容

Backfill Requirements in KBS-type repository (SKB, 2002) のワークショップでは、会議でのコアメッセージが、以下のようにまとめられた。本会議では、性能評価および処分技術の両担当者が出席しての議論があり、技術的な課題および解析での評価の課題のすり合わせも問題となった。

1) 性能評価の観点から再度埋め戻しを考慮すべきである。

これは、解析評価で用いるモデル(インプットされるデータ)と、実際の処分環境との違いを考慮すべきというものである。たとえば、解析モデルでは人工バリアと地表の間の周囲には岩盤が存在するとした場合は、実際の処分環境で存在する地表との間の坑道の存在を無視していることとなり、この場合、坑道は無視できるような処置がされている必要がある。このような解析評価側での仮定と実際の処分環境を作り出す工学技術との両方で矛盾がないことが求められる。

2) 坑道を均一に埋め戻す技術開発が必要である。

工学技術として、適切に坑道を埋め戻す技術が必要である。これも 1 に関連して、坑道内を均一モデルで表現するのであれば、工学的に均一な坑道の埋め戻しを達成する技術が必要である。

3) 現実的な坑道上部の埋め戻し技術。低透水性の実現。

坑道の埋め戻しは、その部分に応じて工学技術の難易度が異なる。たとえば、現場締固めのような工法の場合は坑道上部に効果的な締固めを作用させることが難しく、粗な充填になりやすい。この場合、坑道上部は透水性も大きくなる可能性がある。このような場合、あらかじめ高密度に圧縮成型したブロックを併用する等の技術が必要である。

4) さまざまな施工方法の組み合わせで達成される埋め戻される場所の低透水性。

3) に対応した技術であり、一つの工法だけではなく、いろいろな工法を組み合わせることで、高密度で均一な埋め戻しを達成することが必要である。

5) 海水条件の影響の把握

海水環境条件では、ベントナイトのさまざまな特性が変化すること(たとえば、膨潤性の低下、透水性の増加等)がこれまでの実験データで明らかになっている。ベントナイト混合材である埋め戻し材も、これら海水環境下での影響を考慮した設計要件の設定が重要となる。

6) 長期における埋め戻し材と岩盤との密着

埋め戻し直後の状態では、岩盤と埋め戻し材は密着していると考えられる。このような状況が安全評価の対象となる数千年数万年オーダーで維持するような埋め戻し材の仕様が求められる。

7) 2000 年以降程度の冷却後における掘削影響領域での亀裂開口の抑制。

人工バリア周辺の岩盤内では廃棄体からの発熱による影響で処分後は温度が上昇し、数百年の後には温度も低下する。このような温度変化による収縮の影響(岩盤中、特に掘削影響領域における割れ目の開口等の発生)を考慮した埋め戻しの仕様設定が必要である。

8) 坑道周辺岩盤における熱の影響に起因する掘削影響領域での割れ目の開口。

7) に対応して、割れ目の開口の抑制が現実的でない場合は、その開口の影響を考慮する必

要がある。

- 9) 埋め戻し技術と最新の鉱山技術は経済面でも埋め戻し材を変える可能性がある。
数百メートル以深の地下深部での技術に関しては、類似する環境での工学技術として鉱山技術がある。鉱山技術は常に採算性と効率向上の中で技術革新が目覚しい。これらの最新の技術動向を処分の埋め戻し技術にも適用することが必要である。
- 10) 3次元解析の結果は、掘削影響領域沿いが移行経路になりえることを示す道具となる
2次元の解析では評価できない水理挙動が3次元解析で明らかになる。掘削影響領域は坑道周囲に存在するものであり、地表までの移行経路となりえる。掘削影響領域の移行経路としての可能性の判断には3次元による解析評価が効果的である。

閉鎖という観点から処分場の評価を考えた場合、工学技術として達成できるものと、解析評価として考慮できるものとのギャップがどこまで狭められるかが今後の課題である。この場合、このギャップの定量的な評価が必要である。たとえば、解析でこれ以上の現実的状况をモデルへ取り込むことができないということであれば、工学技術としてそこまでの環境を作り出す技術が求められる。一方、工学技術としてこれ以上理想的な環境を作り出せないということであれば、その部分は解析に取り込んで解析評価する必要がある。これらをすべて定量的に評価することで開発課題へ反映させることができる。これらギャップの定量的な評価ができない場合は、結局保守的な仮定を取り入れた評価を行うこととなる。

3. 閉鎖要素の機能およびその喪失の影響

第2次取りまとめで示した閉鎖の概念は図-3.1 に示すものであり、閉鎖要素は、埋め戻し材、プラグ材、グラウト材である。埋め戻し材は坑道そのものを埋め戻すもの、プラグは処分坑道の両端部に設置する強度プラグ（コンクリートプラグ）と連絡坑道が破碎帯と交差するときに設置する止水プラグ（粘土プラグ）である。グラウトについては、閉鎖要素として取り扱うのは粘土グラウトである。

コンクリートプラグは処分坑道の埋め戻し時に設置され、主要坑道・連絡坑道が埋め戻されるまでの期間（コンクリートプラグの一端が空間として開放されている間）、処分坑道を封じ込めるための力学的機能が求められる。主要坑道・連絡坑道が埋め戻された後は、コンクリートプラグの力学的機能はそれ以上期待しない。これはコンクリートの劣化を考慮して、超長期に渡る強度の維持を期待しないというものである。それと同時に、超長期において処分環境への化学的な影響が少ないことが望まれる。

粘土グラウトは止水プラグの対象となる破碎帯内に充填して止水性能を高める効果を期待する。粘土グラウトは注入された割れ目内で固化するわけではなく、その割れ目内の目詰まりにより低透水性を発揮するものである。このため、長期安定性（そこに留まっているということ）を評価できないことから、低透水性の維持を補完するものと考えられる。

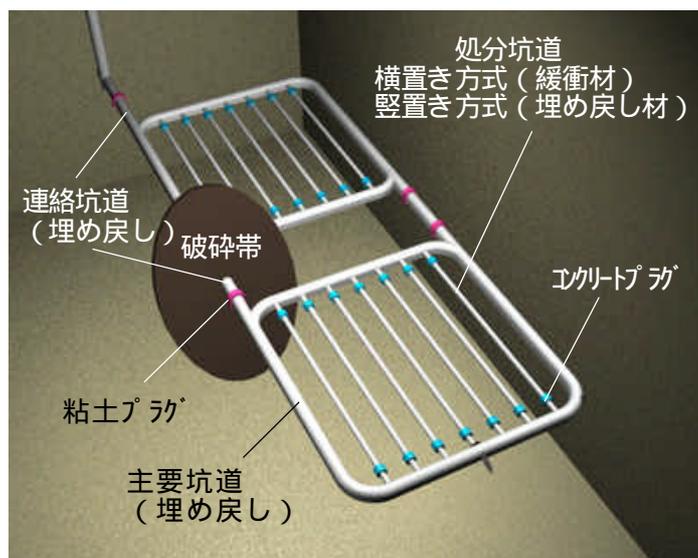


図-3.1 第2次取りまとめにおける閉鎖概念
(核燃料サイクル開発機構, 1999a を一部改)

ここでは、材料そのものは粘土や掘削ずり(坑道掘削時に発生する岩盤の破碎物)という天然のもので、超長期においても安定である埋め戻し材、止水プラグについて、その機能(要件、材料特性、実規模での性能)、機能喪失の影響について現在の知見を取りまとめた。

3.1 埋め戻し材

埋め戻し材は、人工バリア定置後に空間として残っている坑道そのものを埋め戻すものである。縦置き方式の場合は緩衝材との接触、坑道に支保がある場合は支保との接触、支保がない場合岩盤との接触があり、横置き方式では緩衝材との接触がない以外は縦置き方式の場合と同じ設置条件であり、緩衝材や支保材であるコンクリートや岩盤との化学的・力学的相互作用があると考えられる。

(1) 埋め戻し材の要件

第2次取りまとめでは、Pusch が示した埋め戻し材の要件 (Pusch, 1998) 等を参考にその機能を検討した。一つ目は、坑道そのものが「卓越した水みち」とならないように低透水性の材料であること、二つ目は、坑道の変形をある程度抑制する剛性を持った材料であること、三つ目は、新たな空隙の発生を充てんする膨潤性を備えていることである。坑道そのものが卓越した水みちとならないということは、「連続した水みち」にもならないということである。

(2) 材料特性

埋め戻し材としては、第2次取りまとめではベントナイトとケイ砂の混合体を材料として要素試験により物性を取得した。ここで、具体的な地質環境が決まっていないため、実際の処分で使用されると考えられる掘削ずりをケイ砂で模擬した。

要素試験の結果 (Komine et al., 1991; 杉田ほか, 1999) から、ベントナイトをある程度 (20wt%) 混合することで材料は低透水性 (10^{-12} m/s オーダー) になることがわかっている。有効粘土密度で整理すると、 500kg/m^3 以上であれば上記低透水性は確保でき、さらに 900kg/m^3 以上であればほぼ一定値になる (杉田ほか, 1999)。

(3) 実規模での性能

要素試験のような実験室レベルでは十分な低透水性が確保できたとしても、実際の坑道規模でそのような性能が確保できるかどうか確認する必要がある。

坑道規模での埋め戻し材の性能の検証として、Backfill and Plug 試験 (Börgesson, 1997) やプロトタイプ処分場プロジェクト (Dahlström, 1998)、立坑の埋め戻し部の止水性能の把握に関しては RESEAL プロジェクト (Dereeper and Volckaert, 2002) がある。

Backfill and Plug 試験およびプロトタイプ処分場プロジェクトは、縦置き方式の処分概念における処分孔上部の処分坑道の埋め戻しの性能の検証を想定している。Backfill and Plug 試験では坑道の埋め戻し性能の検証が可能であり、プロトタイプ処分場プロジェクトでは試験孔の人工バリアとの相互作用 (とくに緩衝材との相互作用) に関する検証が可能である。

埋め戻しの施工は図-3.2 に示すように斜め締固め工法が採用されている。これは、巻きだした材料に対して振動コンパクターで締固めエネルギーを与えるものである。岩盤が作用するエネルギーに対して十分な強度を有し、湧水量も施工に支障がなく、岩盤表面が凸凹している場合には、岩盤表面の形状への対応も十分に可能である現場締固め工法の内斜め締固め工法が適している。

坑道の上部ではエネルギーの供給が十分でないため、締固め密度が小さくなると予想され

る。そこで、坑道上部にはあらかじめ高密度に圧縮整形した粘土ブロックを施工し、密度の部分的な低下を抑制するような工夫が施されている。Backfill and Plug 試験ではベントナイトを混合しないものも含めて 3 種類の材料を埋め戻し材として試験しているが、プロトタイプ処分場プロジェクトでは 1 種類の材料で設置されている。

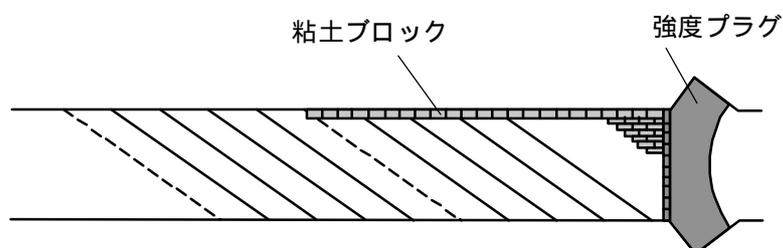


図-3.2 Backfill and Plug 試験の断面図

一方、立坑の埋め戻しに関する RESEAL は、内径 1.4m (掘削径は 2.2m)、深さは 24m の立坑を用いた試験である。立坑は深さ 16m までがコンクリートプラグ、その上部に厚さ 2.24m のベントナイトシール (パウダー / ペレットの混合) がある。ベントナイトシール部の下部 60cm は、締固めあり (1550kg/m^3) で、上部の 184cm は、締固めなし (1400kg/m^3) である。

上記 3 つのプロジェクトは現在進行しているものであり (たとえば Goudarzi et al., 2002; Goudarzi and Börgesson, 2002), 閉鎖性能に関するデータが今後引き続き取得される。

(4) 機能喪失の影響

所期の機能を発揮するように設置した埋め戻し材の機能が変化する要因としては、岩盤あるいは支保との相互作用が考えられる。クリープ変形等により坑道の断面が小さくなる傾向の場合、埋め戻し材はより高密度に圧縮されることとなる。この結果、透水性はより低くなり、剛性は大きくなると考えられる。密度が大きくなることから膨潤性能は増加すると考えられる。このように、坑道断面が小さくなる作用は埋め戻し材の機能を高める方向に作用する。

一方、坑道断面が増加する場合は機能喪失の面で影響があると考えられる。軟岩の場合、坑道には支保工が施工される。硬岩の場合にも必要に応じて坑道壁面には吹付け等のコンクリート材が施工されることが考えられる。詳細は後述するが、コンクリートは長期の間には Ca 分の溶出により体積が減少すると考えられる。このような場合には埋め戻し材の充填すべき断面積が大きくなり、密度の低下が起こる可能性が考えられる。密度の低下は剛性の低下、透水性の増加をもたらす。しかしながら、要素試験結果から有効粘土密度で 500kg/m^3 以上であれば低透水性が確保できると考えられることから、予想される体積減少率を見込んだ密度で施工することで、透水性の機能低下は抑制できると考えられる。

コンクリート材料を使用した場合は、この体積減少に加えて、ベントナイトの変質が問題となる。これは、コンクリート浸出液との接触によりベントナイト成分が溶解することによる機能の低下である。このコンクリートの劣化とベントナイトへの影響に関しては、「4.2 支保の劣化」で詳細に述べる。

3.2 止水プラグ

止水プラグは、連絡坑道と核種移行に有意な影響を与える（区画として避けなければならない）可能性のある破砕帯との交差部において、破砕帯の両側に設置して連絡坑道と破砕帯間の水理的経路を分断するものである。

(1) 連絡坑道と破砕帯の交差について

破砕帯と連絡坑道との交差の可能性は、考慮する地質環境条件と処分場の規模の関係による。

地表まで到達するような破砕帯の存在に関しては、図-3.3 に示すように亀裂のトレース長と累積割れ目個数との関係がまとめられている（澤田ほか，2002；Sawada et al., 2002）。これは、大野・小島（1992）に基づいた研究事例をベースに取りまとめたものである。図から、亀裂の大きさと密度はスケールに対して連続して分布し、スケールに依存していることがわかる。

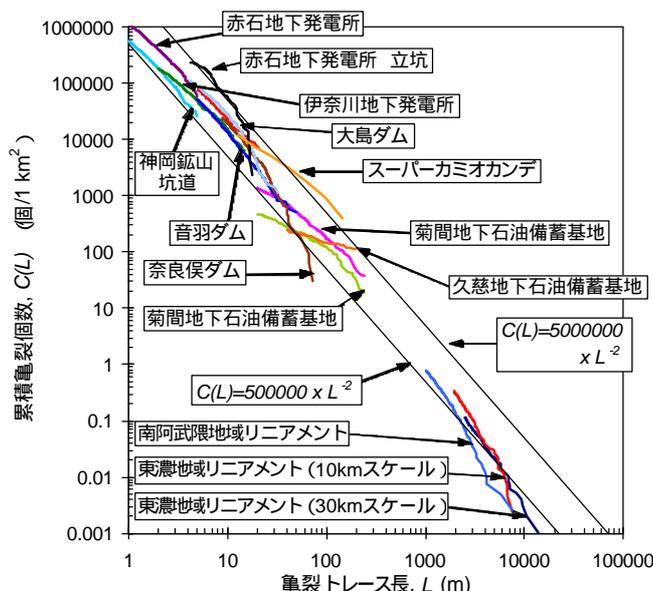


図-3.3 亀裂トレース長の累積頻度分布
（澤田ほか，2002；Sawada et al., 2002 を一部改）

表-3.1 破砕帯の頻度モデル

岩種	傾向	仮想地質モデルでの候補エリア（10km×10km）
結晶質岩	数km～数百kmの範囲でばらつきや偏りを示す。	数十kmの連続性を有する破砕帯 1本 数km～10kmの連続性を有する破砕帯 15本 数百m～10kmの連続性を有する破砕帯 多数
堆積岩	地質年代が新しいほど分布密度は少ない。	数十kmの連続性を有する破砕帯 1本 数km～10kmの連続性を有する破砕帯 3本 数百m～10kmの連続性を有する破砕帯 約10本

棚井らは、破碎帯の頻度を緒方・本荘(1981)、大野・小島(1992,1993)、井上ほか(1992)の分類に基づき表-3.1の破碎帯頻度の仮想地質モデルを設定し、処分パネルの配置を検討した(棚井ほか,1999)。

棚井らの評価では、上記表で設定した破碎帯はその延長線上にも連続するものとし、縦置き方式で1.2km²、横置き方式で0.47km²以上の破碎帯のない区画が必要であるという条件でパネル配置を検討した。この検討では、上記面積のパネルを破碎帯のない区画に設置できるとしているが、同時にパネル間の連絡坑道は破碎帯と交差するとしている。また、処分パネル建設時に予測できなかった破碎帯と遭遇した場合、当該区域におけるパネルの設置を放棄して遭遇した坑道を連絡坑道として扱い、減少した処分面積を確保するためパネルを次の区画に拡張することで対処が可能としている。

以上のことから、処分パネル間には破碎帯と交差する連絡坑道が存在する可能性もあることが考えられる。閉鎖性能の観点からは、これらの破碎帯が核種移行上有意な影響を与えるものであるかどうか問題となる。

(2) 破碎帯の水理特性

破碎帯の水理特性に関しては、第2次取りまとめで国内での研究事例について調査が行われている(井尻ほか,1999)。これによると、結晶質岩と堆積岩で多少の差はあるものの、 $10^{-9} \sim 10^{-4}$ m/s に分布している(米田・小屋開地,1993)。また、破碎帯内でも粘土部と角礫部では、粘土部で $10^{-8} \sim 10^{-5}$ m/s、角礫部で $10^{-6} \sim 10^{-3}$ m/s という結果もある(田中・井上,1995)。これらから、第2次取りまとめでは破碎帯の透水係数は $10^{-9} \sim 10^{-3}$ m/s とした。

諸外国においても、破碎帯の透水性に関する知見は蓄積されてきている(たとえば、Davision et al., 1998)。

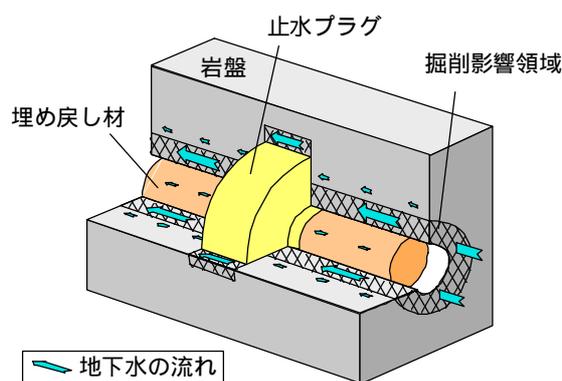


図-3.4 止水プラグの設置状況

(3) 止水プラグの要件

止水プラグは破碎帯と連絡坑道間の水理的経路を分断するものであることから、止水プラグそのものは低透水性の材料である必要がある。また、この分断機能は長期にわたり求められることからプラグ材料そのものも化学的に安定な材料とする。連絡坑道の周辺岩盤には掘削影響領域が分布し、「4.1 掘削影響領域の水理特性」で示すように坑道沿いに連続する水理的経路が存在すると考えられることから、図-3.4 に示すように掘削影響領域を分断するよう

に設置する必要がある。

(4) 材料特性

止水プラグは、長期の止水性能が求められることから、緩衝材と同等のベントナイト含有率が高い材料で製作される。要素試験による緩衝材の物性取得において高密度の圧縮成型体が低透水係数を確保できることが確認されており、また、さらに大型のブロックを複数組み合わせ合わせた供試体での試験が行われている。乾燥密度 1800 kg/m^3 、ケイ砂混合率 30% の材料で、直径 50cm、厚さ 5.3cm の円盤状の供試体で得られた透水係数は 10^{-13} m/s オーダーであり、一体の試験体での要素試験と同等の止水性能を示すことが確認された(古市ほか,1998)。

(5) 実規模での性能

止水プラグは高密度の粘土材料であることから、要素試験では十分な止水性能が発揮されることが上述したような試験において確認されている。しかしながら、どのようなプラグを設計・施工し、それがどのような性能を持っているかについては実規模のプラグによる性能試験によって確認する必要がある。カナダ AECL の URL で実施しているトンネルシーリング性能試験は図-3.5 に示すように実規模のプラグを中心とした閉鎖性能に関するデータを取得するプロジェクトである (Chandler et al., 1998, 2001)。

トンネルシーリング性能試験では、現場での各計測により確認された坑道壁面からの径方向の掘削影響領域の広がり(最大 70cm)を考慮して 1m の切欠きを備えたプラグの構造(図-3.6)とした(杉田・升元, 2001)。

止水プラグは、粘土ブロックと吹付け層で構成される、いわゆる粘土プラグである。材料はケイ砂混合率 30% で、ブロックの乾燥密度は 1900 kg/m^3 、吹付け層は 1300 kg/m^3 である。飽和後の平均乾燥密度は 1800 kg/m^3 と推定される。現在、圧力チャンバーの水圧 4MPa までの加圧試験が終了し、引き続き加熱試験が行われている。

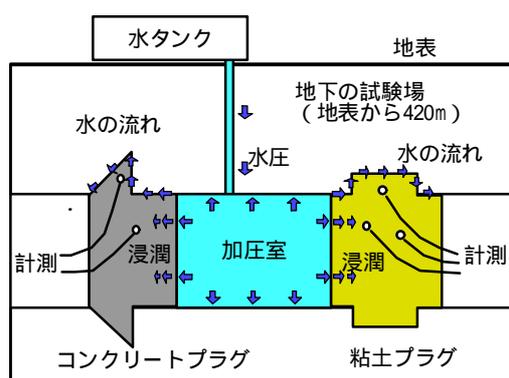


図-3.5 トンネルシーリング性能試験の模式図

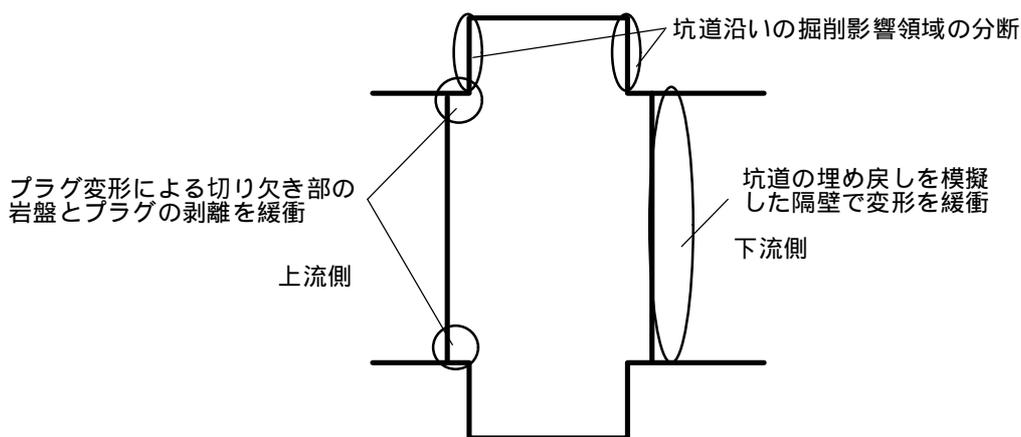
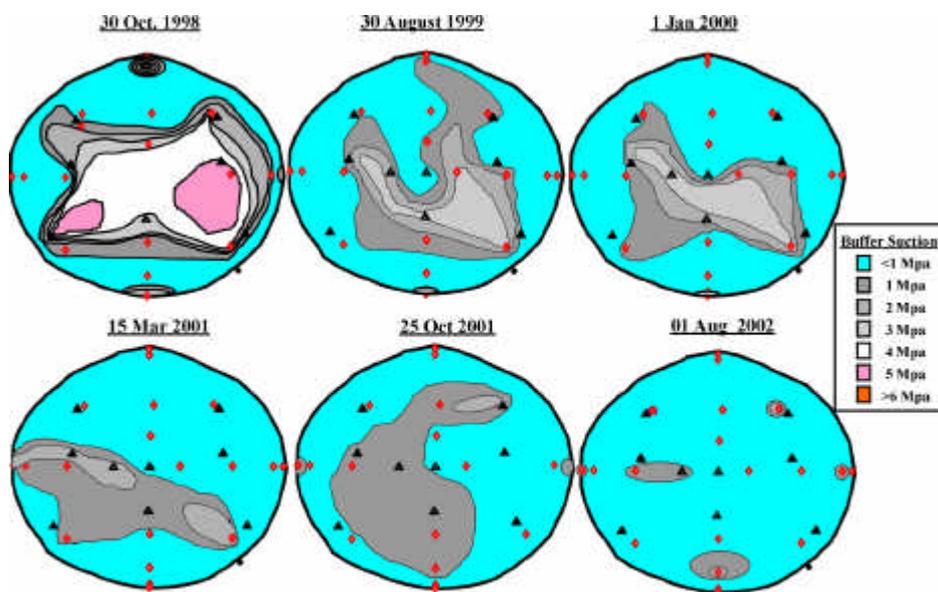


図-3.6 粘土プラグの設計

図-3.7 は粘土プラグの中心断面における浸潤の経時変化である。図から粘土プラグは 2002 年 8 月の時点でほぼ飽和になったと考えられる。図-3.8 は両プラグの下流部で計測された湧水量の経時変化である。湧水量は注水圧力の増加に伴い増加の傾向があるが、1.0 ml/min 以下と小さい値を維持しており、この値から評価される周辺岩盤を含めた止水プラグ全体の透水係数は 10^{-11} m/s である。湧水の分布からは、湧水はプラグ周辺の岩盤を經由しており、粘土プラグそのものは止水性能を発揮していると考えられる。



SUCTION WITHIN CLAY BULKHEAD
@ Centre of Clay Key

図-3.7 粘土プラグの浸潤の経時変化

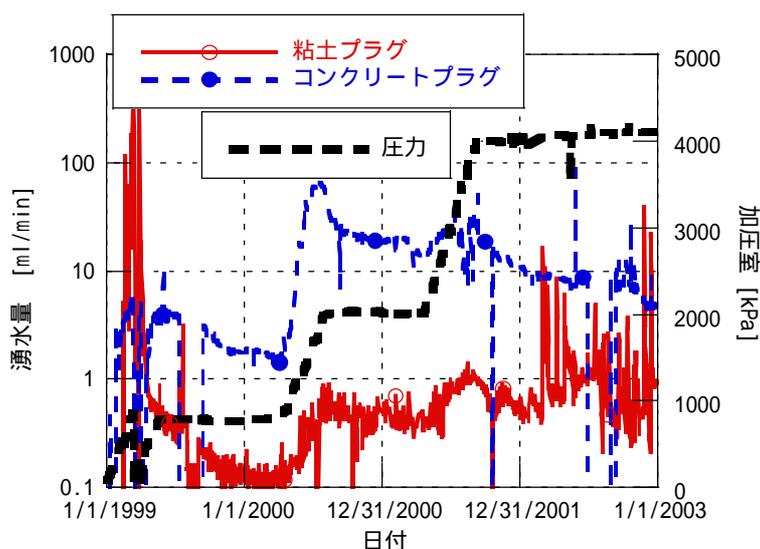


図-3.8 両プラグ下流側での湧水量の経時変化

これまでの計測結果からは、坑道周辺に発生する掘削影響領域を把握することができれば、それをカバーする切欠きを備えた止水プラグを設置することで、坑道沿いの水理的な連続性を分断することができると考えられる。

(6) 機能喪失の影響

所期の機能を発揮するように設置した粘土プラグの機能が変化する要因としては、岩盤あるいは支保との相互作用が考えられる。クリープ変形等により坑道の断面が小さくなる傾向の場合、プラグはより高密度に圧縮されることとなる。この結果、透水性はより低くなり、剛性は大きくなると考えられる。密度が大きくなることから膨潤性能は増加すると考えられる。このように、坑道断面が小さくなる作用は止水プラグの機能を高める方向に作用する。

一方、坑道断面が増加する場合は機能喪失の面で影響があると考えられる。

また、埋め戻し材の設置される環境では、坑道に施工される支保工の影響が無視できないことを述べた。これに対して、止水プラグの設置される環境は、掘削影響領域を分断する形となることから、止水プラグの設置箇所には支保工はないと考えられる。つまり、坑道断面が増加する状況は起こりにくいと考えられる。

もっとも、止水プラグ前後の坑道には支保工が存在することから、支保工の影響によるプラグ材の劣化・変質は考慮しておく必要がある。この場合、劣化・変質により機能を損なうプラグの容積を求め、その劣化・変質分を吸収できる容積のプラグを設置することで対応することが可能と考えられる。

コンクリートの劣化とベントナイト（プラグ材）への影響に関しては、「4.2 支保の劣化」で詳細に述べる。

4. 掘削影響領域の評価

処分パネル-破碎帯間の移行経路として考えられるのは、図-4.1 に示す連絡坑道沿い（連絡坑道内部も含む）の移行経路 A および母岩を通る移行経路 B である。連絡坑道そのものは低透水性の埋め戻し材で埋め戻されるため、連絡坑道沿いの経路としては坑道周辺に発生する掘削影響領域が移行経路になる可能性が考えられる。このとき、処分坑道沿いに存在する掘削影響領域も移行経路 C として移行経路の評価に影響する可能性がある。

岩盤が堆積岩の場合、全ての坑道壁面には支保工が施工されることになる。支保工の材料としてはコンクリートが有力であるが、超長期においては劣化することが考えられる。このため、劣化による体積減少で掘削影響がどのような影響を受けるかについても評価が必要であると考えられる。

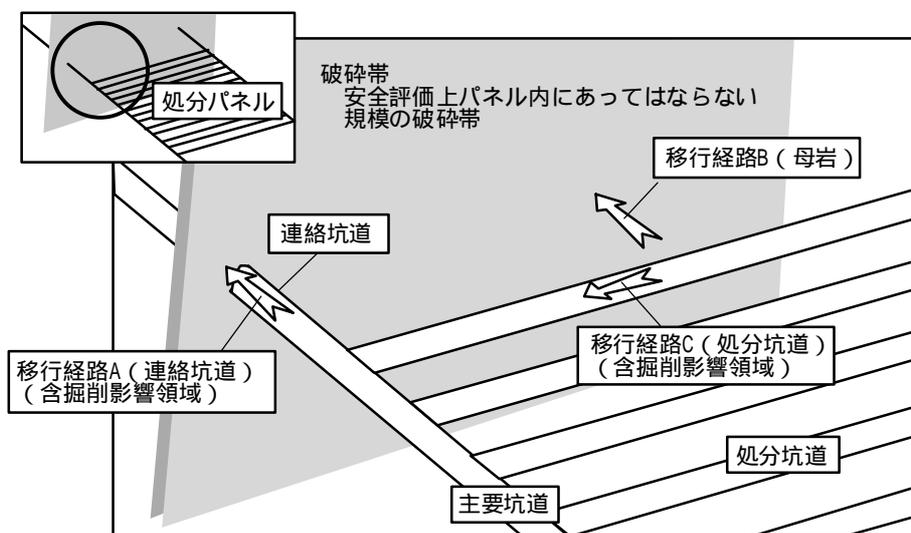


図-4.1 処分パネル-破碎帯間の移行経路

4.1 掘削影響領域の水理特性

掘削影響領域は、坑道を掘削することにより坑道周辺に発生し、坑道が存在する前の透水性とは変化すると考えられる。閉鎖性能の観点から、掘削影響領域の水理特性がどこまで理解されているか調査した。

第2次取りまとめでは発破掘削によるものと機械掘削によるものという工法の違いによる掘削影響領域の発生およびそれによる透水係数の変化について取りまとめている(井尻ほか, 1999)。それによると、坑道径5m程度の坑道において、発破掘削の場合、坑道壁面より1m程度が影響を受けており、そこでは2桁程度まで透水性が増加すると考えられる。一方、機械掘削の場合は、発破掘削に比して影響は小さく、坑道壁面より0.5m程度、透水性の増加は1桁程度と考えられる。しかしながら、これらは局所的なある点(ピンポイント)での評価であり、透水性は低下するという結果も報告されている。

閉鎖性能の評価に資する坑道沿いの掘削影響領域の連続性に関する研究例はない。掘削影響領域の水理特性に関して「連続性がない」といえない現状では、坑道沿いの掘削影響領域は水理的連続性を有し、さらに処分坑道から主要坑道、連絡坑道へと坑道間でもそれは連続し、さらに、そこには地下水流動が存在すると考えておくことも必要である。

4.2 支保工の劣化

堆積岩の場合，坑道壁面はコンクリート支保工が施工されることとなる。また，結晶質岩においても岩片の剥離による落下防止等の観点から吹付け工等の施工がなされるものと考えられる。支保工は，第2次取りまとめで示されたように連絡坑道の壁面に50cm厚さでコンクリートが施工されるものをリファレンスと考える。

(1) コンクリートの透水性

コンクリートの透水係数は，水・セメント比ならびに骨材の最大寸法に依存する。健全なコンクリートの透水係数は図-4.2に示すように 10^{-12} m/s オーダーである。しかしながら，この透水係数は鉄筋の腐食，コンクリートのペースト部分（コンクリートに占める体積は30%程度）の溶出や地下水成分との反応によって時間の経過に伴い変化していく。また，施工時初期段階においても，現場施工の場合のうち継ぎ目が，セグメント施工の場合にはつなぎ目があり，この部分に関しては透水係数が大きくなる。

これまでの知見では，コンクリートの長期的な透水係数を評価することは非常に困難であり，無筋コンクリートを対象とした評価研究が行われている。現状では，コンクリートの最終的な状態としてセメントペースト部分の全てが溶出し，支保の体積が30%減少，この時点で骨材だけが残っており，このときの透水係数は 10^{-5} m/s オーダーと仮定する保守的な評価しかできない。よって，坑道の支保工部分には，この透水係数の透水層が連続して存在するとの考えが否定できない。また，この透水層内には地下水流動も存在すると考えるのが妥当である。

コンクリートの候補材料としては普通コンクリートと低アルカリ性コンクリート（大和田ほか，1997；Gray and Shenton, 1998）が検討されている。

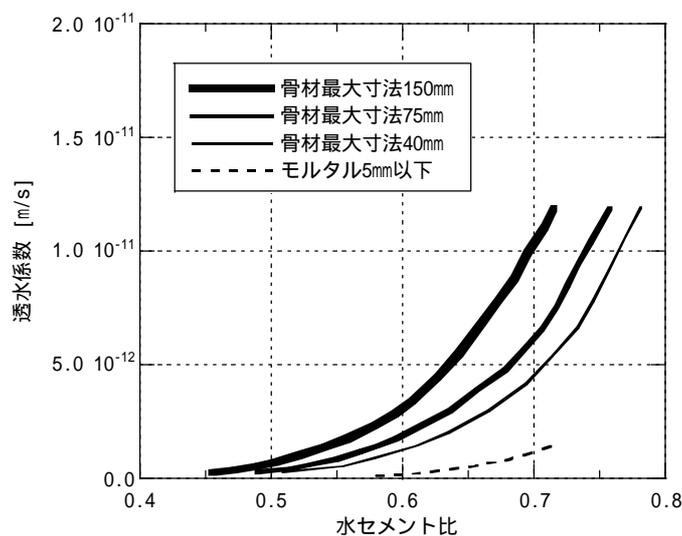


図-4.2 セメント系材料の透水係数の例
(日本コンクリート工学協会編，1997 を基に作成)

(2) ベントナイトへの影響

コンクリートの候補材料としては普通コンクリートと低アルカリ性コンクリートが検討さ

れているが、この理由の一つとしてベントナイトへの影響がある。高アルカリ環境下に長期間さらされると、周辺岩盤やベントナイトを変質させる可能性があり、評価における不確実性が増すこととなる。ケイ砂の存在を無視した極端な評価例ではあるが、コンクリートとベントナイトのマスバランスによるベントナイト溶解の試算では、支保工の厚さが大きくなるに伴い溶解量が増す結果となった。この解析条件では図-4.3 に示すように普通コンクリートで支保工の厚さが 50cm の場合、100% 近くのベントナイトが溶解することとなる。このとき、低アルカリ性コンクリートを用いると、溶解率は 40% 程度に抑制することができる。

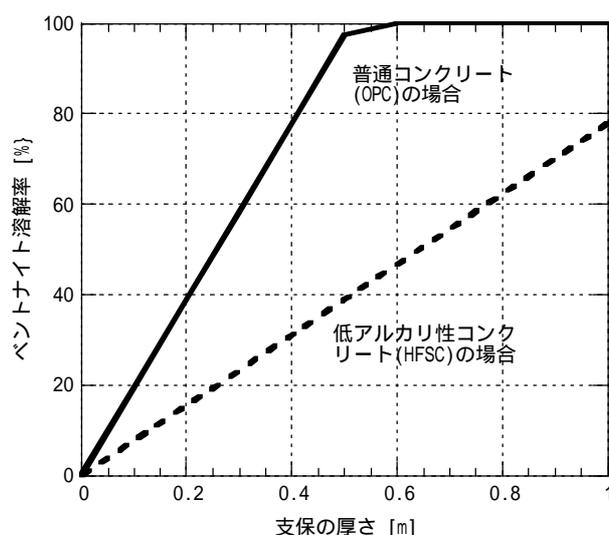
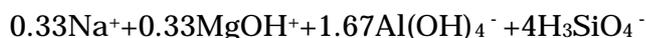


図-4.3 コンクリート支保の厚さとベントナイトの溶解率との関係

以下に、図-4.3 の検討方法の手法を示す。

1) 検討の仮定

ベントナイトのアルカリでの溶解反応として以下の反応式を仮定する。



ここで、モンモリロナイトおよび玉髄 1mol を溶解させるのに必要な水酸化物イオンモル量は 5.01mol および 1.0mol である。コンクリートからの水酸化物イオン量は、セメント中の Na, K, Ca 量によるものと仮定し (OH⁻モル量 = Na のモル量 + K のモル量 + 2 × Ca のモル量), コンクリート支保の厚さとモンモリロナイトの溶解率との関係を計算する。

2) 検討方法

乾燥密度 1.8g/cm³ のケイ砂 85% 混合のベントナイト (モンモリロナイト含有率 45%, 玉髄含有率 30% のクニゲル V1 を想定すると、ケイ砂混合のベントナイトのモンモリロナイトおよび玉髄の含有率は 6.75%, 4.5% となる (モンモリロナイトおよび玉髄の分子量を 367g お

よび 60g と仮定)。1m³ あたりのモンモリロナイトのモル量は 約 331mol および約 1350mol となる。コンクリート 1m³ あたりのセメント量を 300kg と仮定すると、コンクリート中の Na モル量は約 30mol、K モル量は、約 30mol Ca モル量は約 3400mol、となる。コンクリート 1m³ あたりの OH-モル量は、約 6860mol となる。

モンモリロナイト 1mol および玉髄を溶解させるのに必要な OH-モル量は 5.01mol および 1.0mol であるから、1m³ のベントナイト中のモンモリロナイトおよび玉髄を溶解させるのに 約 1660mol および 1350mol の OH-モル量が必要となる。合計すると、3010mol である。

したがって、ベントナイト 1m³ を溶解させるのに必要なコンクリート量は約 0.43m³ (=3010mol/6860mol)となる。

図-4.4 における坑道断面のベントナイトとコンクリート支保面積比が 0.43 となると、モンモリロナイトが全て溶解するものと仮定する。

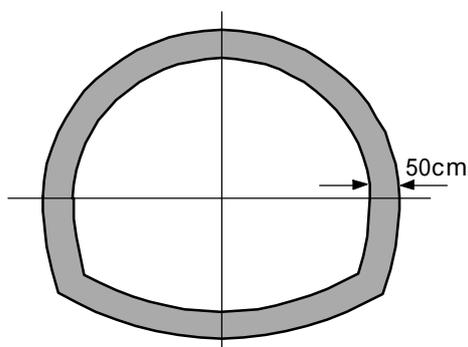


図-4.4 坑道の断面

以上のように、コンクリートが共存する環境ではベントナイトの喪失という現象が起こると考えられることから、変質量を見込んだ機能の評価が必要になると考えられる。しかしながら、この溶解量評価は極端な仮定の下での試算結果であり、ベントナイトの変質への影響に関する現実的な評価技術が開発された段階で再度評価を行うことが必要である。

5. 坑道沿いの流れに関する水理解析

4.掘削影響領域の評価の図-4.1 で移行経路として連絡坑道沿いの掘削影響領域(移行経路 A),母岩(移行経路 B),処分坑道沿いの掘削影響領域(移行経路 C)の3つの経路を示した。処分パネル-破砕帯間の地下水流動の評価を行うため,第2次取りまとめでの取り扱いと閉鎖性能の観点からの取り扱いの比較を表-5.1 に示す。

表-5.1 閉鎖性能にかかわる評価の比較

	第2次取りまとめ	今検討での考え方
破砕帯と処分パネル間の連続性	・処分場としては閉じた系であり,処分場から破砕帯への核種のバリア性能として100mの母岩を想定。	・処分パネル間を接続する連絡坑道が破砕帯と交差する。 ・破砕帯と交差する連絡坑道の前後には切欠きを持った止水プラグを設置しておく。

表-5.1 での比較の模式図を図-5.1 に示す。左図は第2次取りまとめで想定した評価の模式図である。第2次取りまとめでは処分場最下流部の処分坑道から下流側の母岩を核種移行解析の対象としている。移行経路Cは地下水流動解析では考慮されているが,核種移行評価上は核種は瞬時に混合すると仮定してバリア性能から除外している。一方,閉鎖性能の観点からの評価の模式図が右図である。第2次取りまとめにおける想定に対して,処分坑道沿いの掘削影響領域内における移行(移行経路C)ならびに連絡坑道沿いの掘削影響領域内における移行(移行経路A)が追加される。

本章では,処分場下流側の母岩中に連絡坑道が存在した場合に,処分坑道周辺の掘削影響領域を通過する地下水流量(人工バリアの外側境界条件)や処分坑道と連絡坑道を含む水平断面における水頭分布に与える影響について検討した。

解析モデルとしては三次元亀裂ネットワークモデルならびに水平二次元断面における均質モデルの2種類を用いた。前者は第2次取りまとめで実施した200m×200m×200mの領域を対象とした亀裂ネットワークモデルに,処分坑道と下流側境界を連絡する連絡坑道ならびに掘削影響領域を追加したもので,第2次取りまとめの解析に対して連絡坑道の存在が周辺の地下水流動場にどの程度の影響を与えるかについて検討した。後者は,処分坑道と連絡坑道を含む200m×200mの水平二次元断面を対象としたモデルで,母岩は均質な透水量係数を設定し,幅3mでモデル化した坑道部分では坑道部の透水量係数の変化が周辺の地下水流動場に与える影響,ならびに連絡坑道と処分坑道の連結部に設定したプラグの存在が与える影響について検討した。

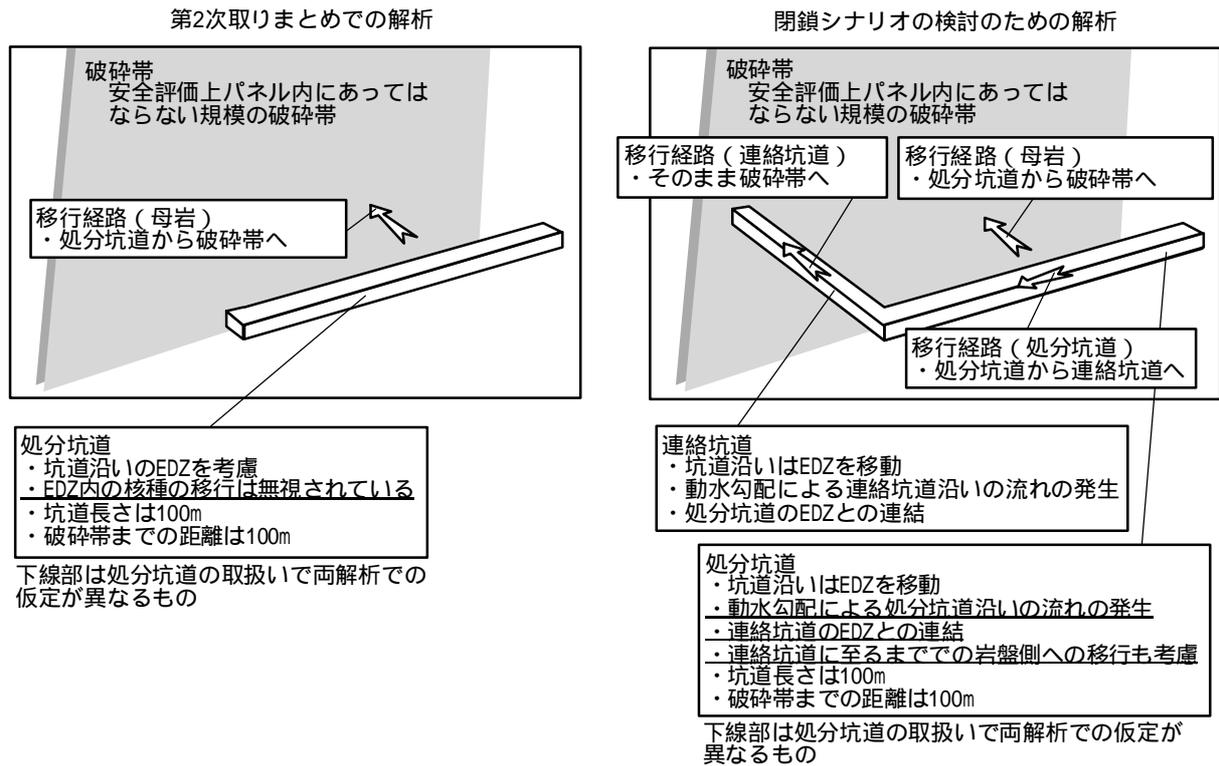


図-5.1 水理解析の概念

5.1 亀裂ネットワークモデルによる解析

連絡坑道と処分坑道のモデル化は、横 3.2m×縦 3.2m の直方体を 4 枚の亀裂モデルで表現し(図-5.2 参照)、これら 4 枚の亀裂を掘削影響領域とみなした透水量係数 ($5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} =$ 母岩の平均透水量係数 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \times 10 \text{ 倍} \times$ 厚さ 0.5 m) を設定した。なお、第 2 次取りまとめにおいては、50 リアライゼーションの亀裂ネットワークモデルを用いた解析を実施しているが(核燃料サイクル開発機構, 1999b)、本検討においては 6 リアライゼーション(6 つのパターンを計算した)について検討した。境界条件については、第 2 次取りまとめレファレンスケースでの設定(上流側境界と下流側境界に所定の動水勾配(0.01)になるように固定水頭境界、それ以外の側方境界は全て不透水境界とする)を使用した。

図-5.3 に処分坑道を含む水平断面における水頭分布を示す。同図では連絡坑道追加有無の水頭分布をそれぞれ示している。また、処分坑道ならびに連絡坑道を通る地下水流量を 6 リアライゼーションまとめて図-5.4 に示す。これらの結果から、水頭分布、処分坑道(200m)周辺の掘削影響領域を通る地下水流量に顕著な影響はないことが分かる。これは、連絡坑道周辺の掘削影響領域の透水量係数は処分坑道と同様に $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ を設定したが、モデル化している亀裂は流動方向に平行な方向と垂直な方向にそれぞれ分布し、その透水量係数は 10^{-13} から $10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ に分布しているため、そこに $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ の透水量係数を持つ数 m 幅の透水部が付加されてもその影響は大きくないため、と考えられる。

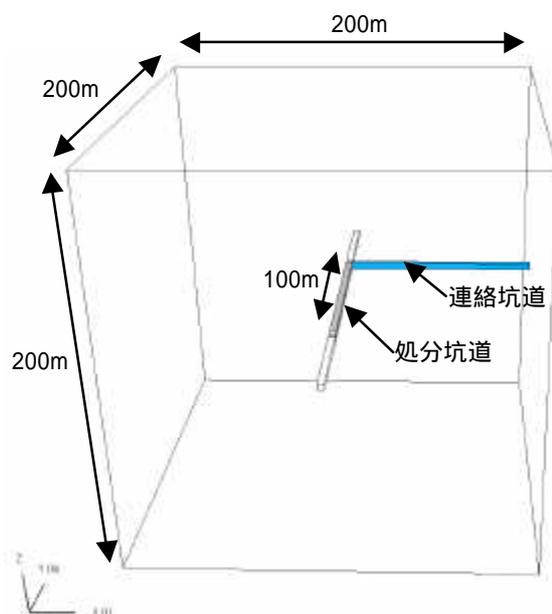
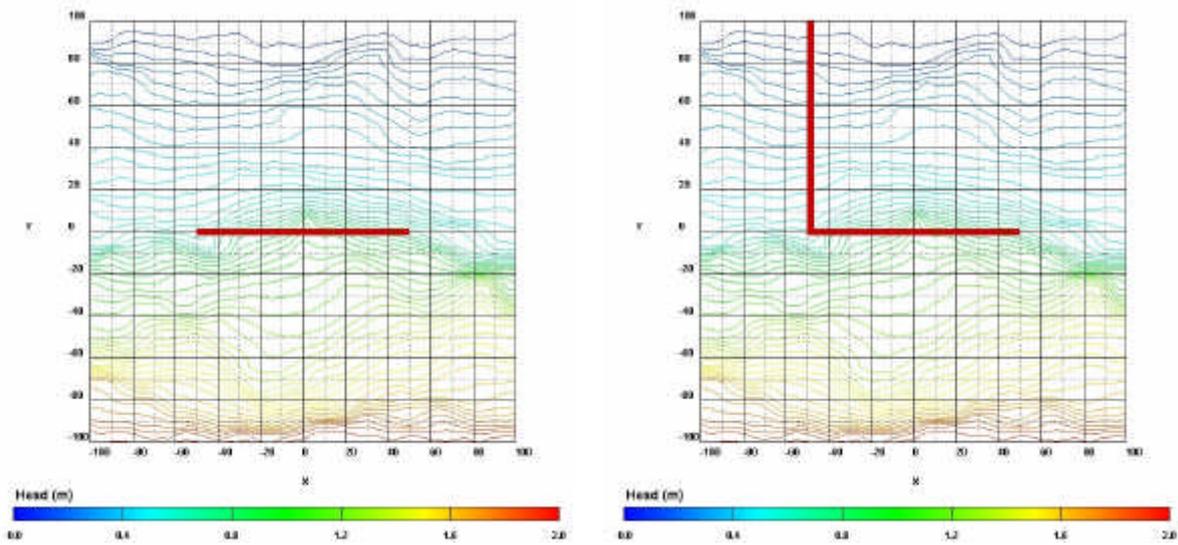


図-5.2 第 2 次取りまとめレファレンスで設定された処分坑道と追加した連絡坑道



(a) 第2次取りまとめ解析結果

(b) 連絡坑道を追加した解析結果

図-5.3 水平断面における水頭分布 (1 リアライゼーションの結果)

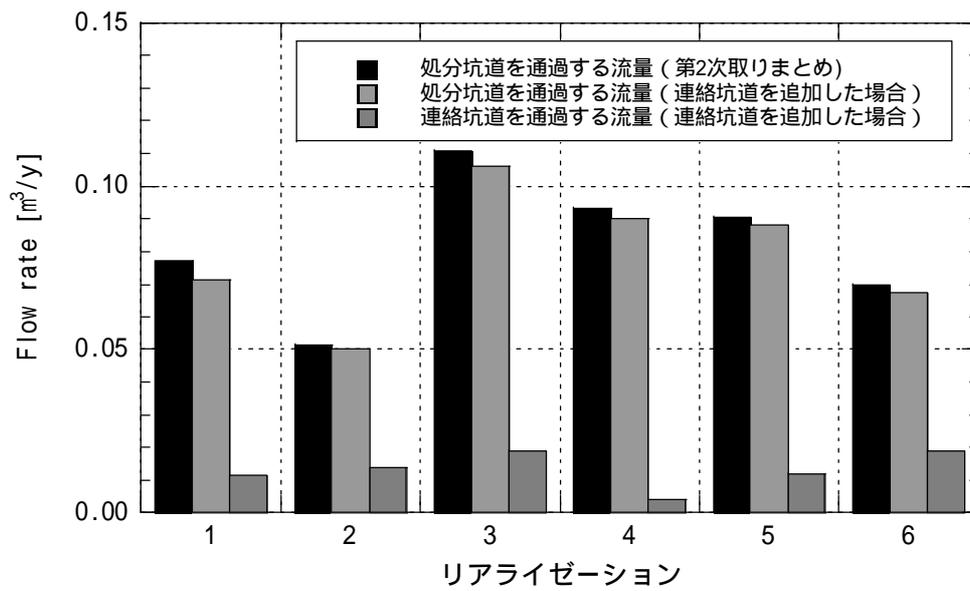


図-5.4 処分坑道 (200m 全体) および連絡坑道を通過する流量

5.2 均質二次元平面モデルによる解析

5.1 では亀裂ネットワークモデルのように不均質な場を表現したモデルを用いたため、連絡坑道の影響の有無を明示することができなかった。したがって、本項では、対象となる母岩の透水性として均一な値を仮定することで、連絡坑道の影響の有無をより定量的に検討するとともに、連絡坑道及び付随する掘削影響領域や埋め戻し材などの透水性をパラメータとした感度解析を行った。また、連絡坑道にプラグを施工した場合の水理学的影響についても検討した。なお、解析は簡便のため、処分坑道を含む水平二次元断面、母岩の透水量係数を均一（ 10^{-9} と 10^{-10} m^2/s の2ケースを設定）に設定した。処分坑道ならびに連絡坑道は幅3m×長さ100m（連絡坑道は99m）を仮定し、その坑道領域の透水量係数をパラメータに感度解析を実施した。この場合、坑道領域を掘削影響領域もしくは埋め戻し材の劣化と想定することが可能だが、母岩の三次元的な連続性は坑道領域によって分断されており、坑道の存在の影響が三次元的な検討より坑道の影響が出る可能性がある。また、処分坑道と連絡坑道の連結部にプラグ（母岩と同じ透水量係数）を設定した解析も実施した。

図-5.6 に各坑道の透水量係数が母岩の10倍のケースの水頭分布を示す。この結果から、母岩の透水量係数が 10^{-9} 、 10^{-10} m^2/s のどちらの場合も連絡坑道にそって水頭値が変動している様子がわかる。また、処分坑道を通る地下水流量（図-5.7）は連絡坑道なしのケースに比べて若干増加しているものの、その程度は僅かである。

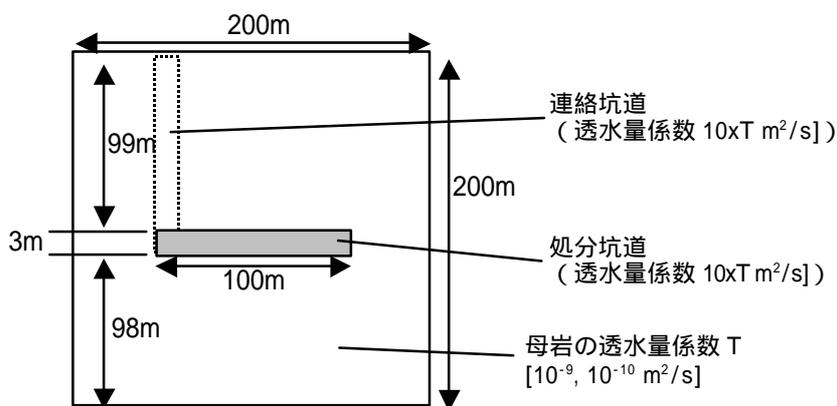
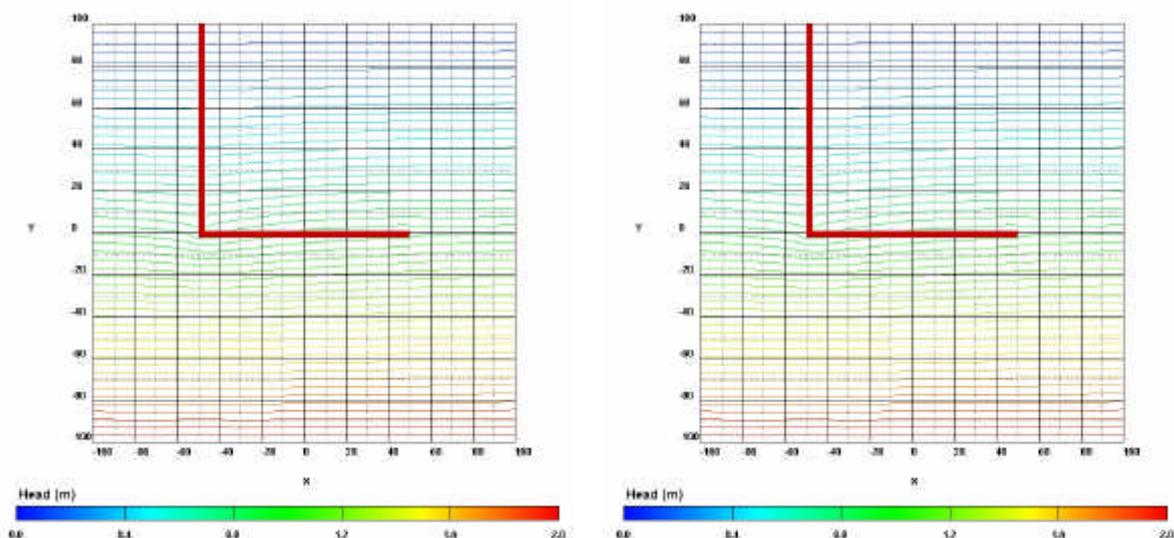


図-5.5 均質二次元平面モデル



(a) 母岩の透水量係数 $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ のケース (b) 母岩の透水量係数 $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ のケース
 図-5.6 均質二次元平面モデルの連絡坑道を追加したケースにおける水頭分布

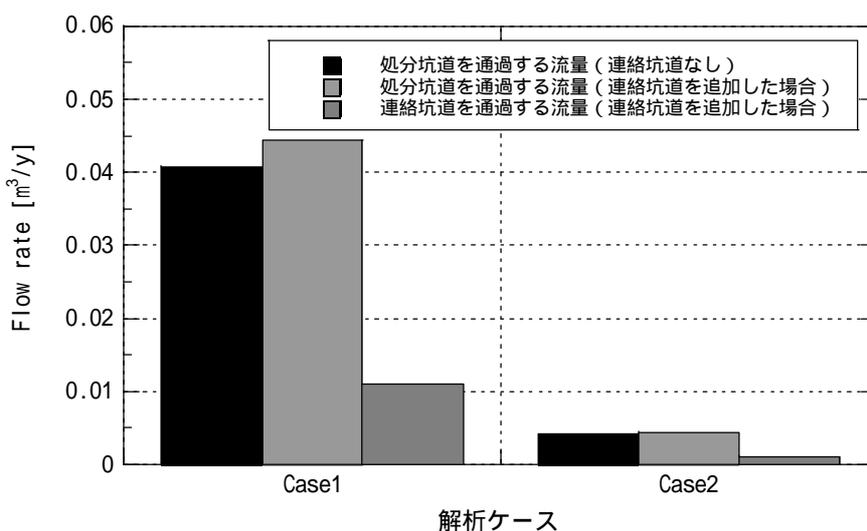


図-5.7 均質二次元平面モデルの処分坑道および連絡坑道を通する流量
 母岩の透水量係数：Case1= $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ，Case2= $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$

母岩の透水量係数を $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ として、各坑道の透水量係数をパラメータに感度解析を実施した。各坑道の透水量係数は 10^{-9} 、 10^{-8} 、 10^{-7} 、 10^{-6} 、 $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ の5ケースを設定した。ここでは、掘削影響領域の不確実性を考慮して幅広く値を設定した。なお、 $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ の値は4.2での支保工の劣化時の透水性と同程度の値となる。また、処分坑道と連絡坑道の連結部に母岩と同じ透水量係数のプラグ（幅 $3\text{m} \times$ 長さ 1m ）を設定して、その有無の影響について検討した。

解析の結果、水頭分布を図-5.8 に、坑道を通する地下水流量を図-5.9 に示す。図-5.8 から、水頭分布に関してはプラグありの場合連絡坑道に圧力勾配が集中するのがわかる。これは、母岩と坑道の透水量係数の差が大きくなるほど顕著であり、プラグによる流れ場の遮断の効果が伺える。

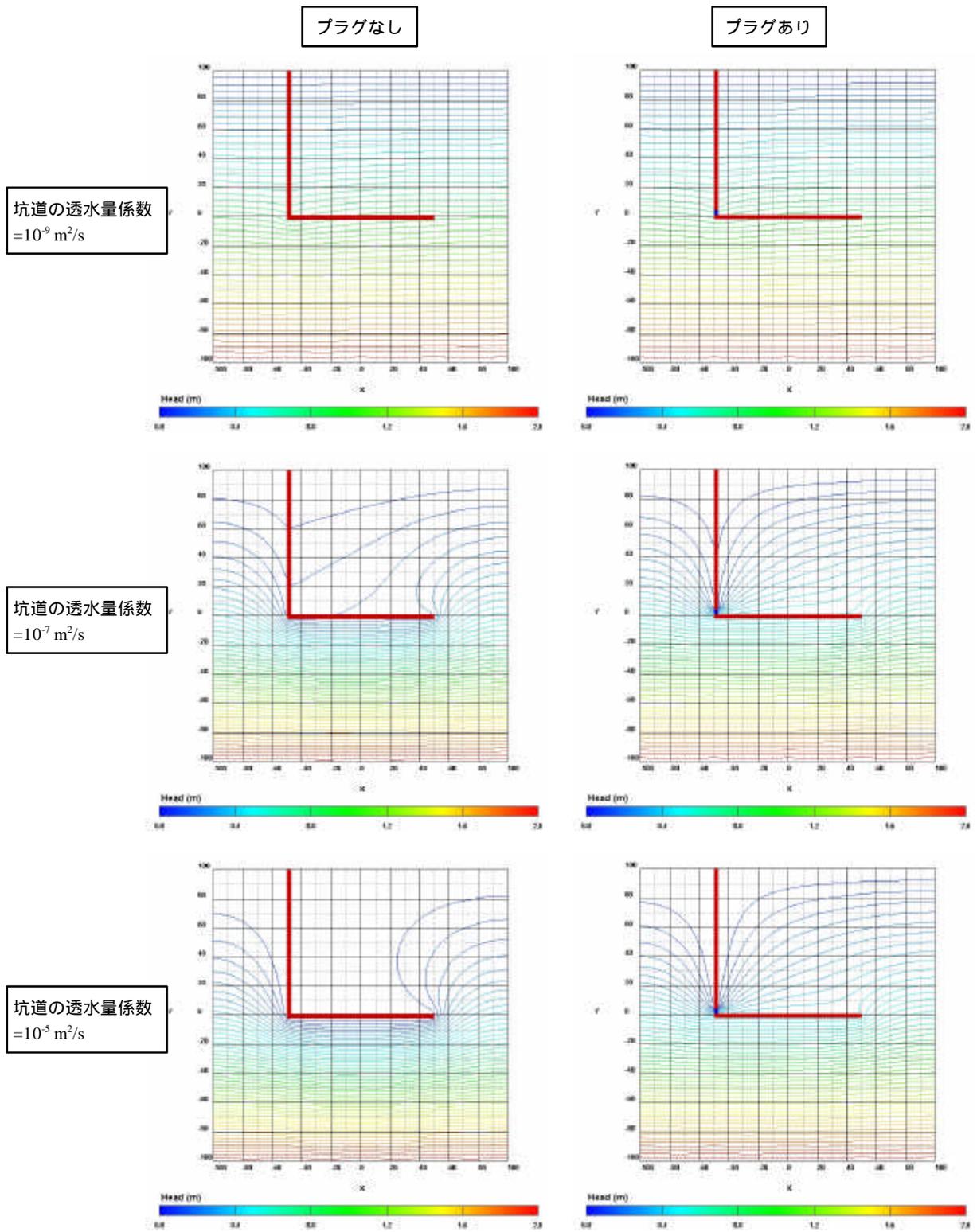
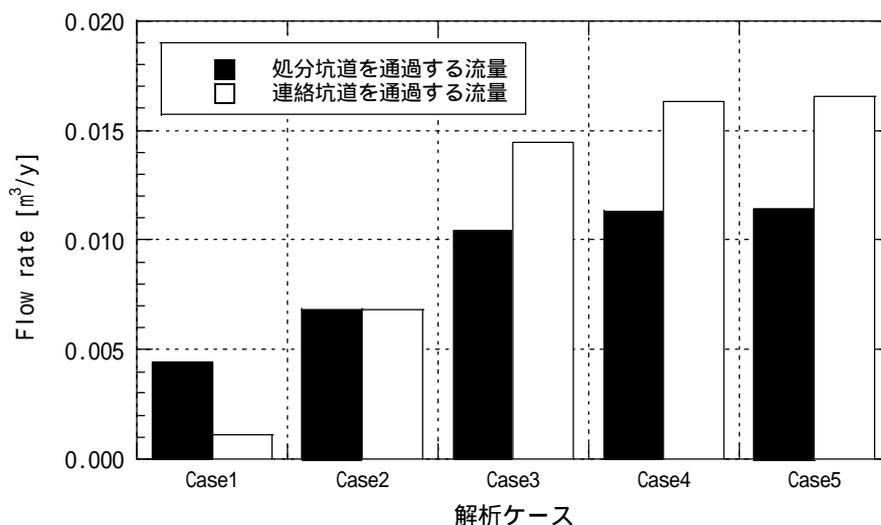
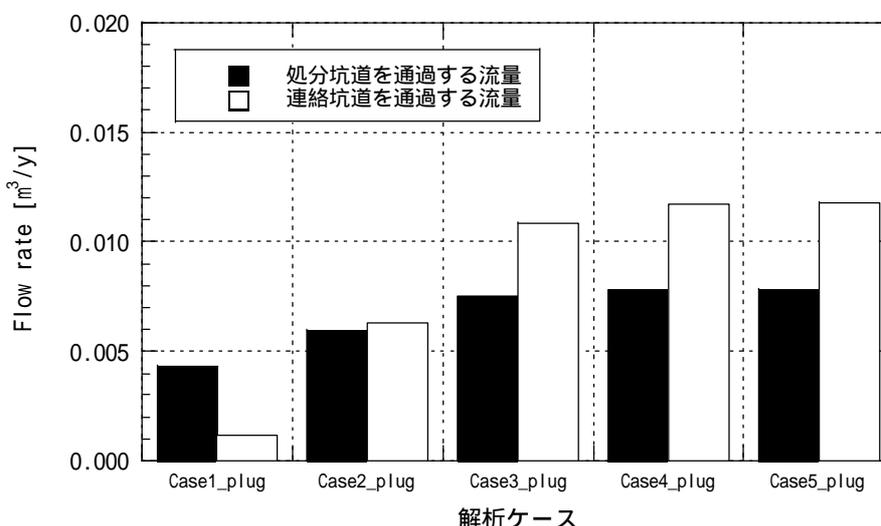


図-5.8 均質二次元平面モデルを用いた解析結果（水頭分布）



(a) プラグなしのケース



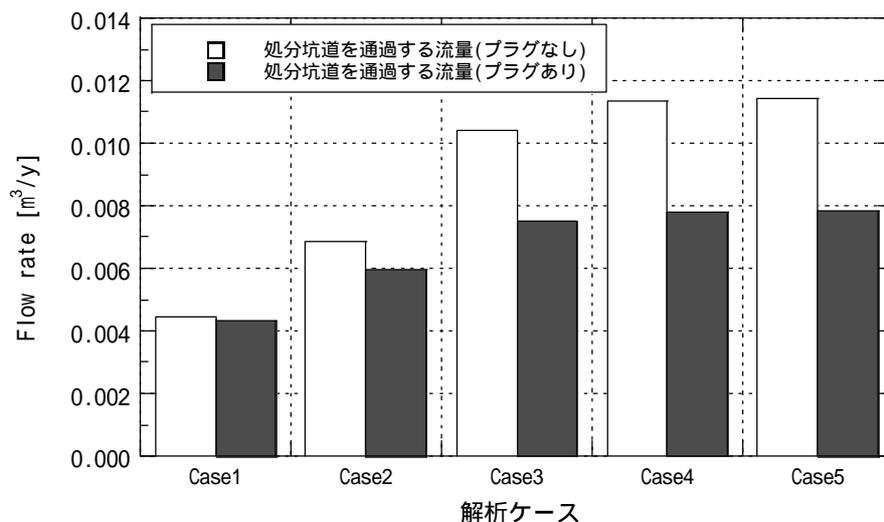
(b) プラグありのケース

図-5.9 均質二次元平面モデルの処分坑道および連絡坑道を通過する流量

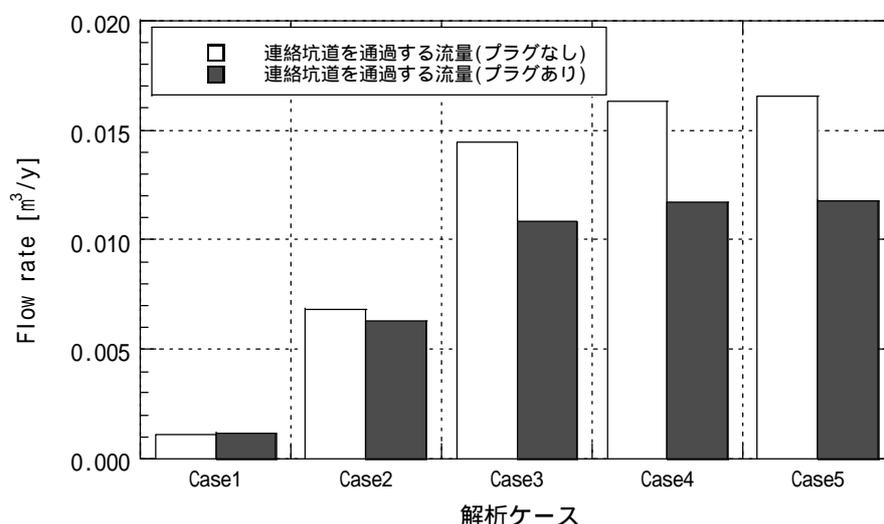
母岩の透水量係数： $10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$

坑道の透水量係数：[Case1= $10^{-9} \text{m}^2/\text{s}$, Case2= $10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$, Case3= $10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$, Case4= $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, Case5= $10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$]

図-5.9 から、坑道の透水量係数が大きくなるにしたがい、処分坑道および連絡坑道を通過する地下水流量は増加するが、母岩に対して3桁以上大きくなるとそれぞれの坑道の通過流量の増加の程度が鈍化することがわかる。坑道間での通過流量の比較では、母岩の透水量係数と坑道の透水量係数の差が1桁であるCase1では処分坑道の通過流量が連絡坑道の通過流量より多いが、Case2ではほぼ同じ通過流量となり、より透水量係数に関して母岩とのコントラストが顕著になるCase3以降は、逆に連絡坑道の通過流量が多くなる。この傾向はプラグの有無に関係なく同じである。



(a) 処分坑道



(b) 連絡坑道

図-5.10 各坑道を通過する流量の比較

図-5.10 は、図-5.9 を各坑道の通過流量に対するプラグの有無の影響で表したものである。図から、処分坑道の流量はいずれのケースでもプラグありの場合の通過流量がプラグなしの場合より少なく、プラグの設置の効果が現れている。とくに、母岩の透水量係数との差が3桁以上となるケース3以降では流量の差が顕著である。一方、連絡坑道の流量に関しては、Case1ではプラグがあることにより流量は逆に多くなっているが、それ以外のケースではいずれもプラグの効果と見られる流量の低下が見られる。連絡坑道の場合も、母岩の透水量係数との差が3桁以上となるケース3からは流量の差が顕著である。

6. 閉鎖性能に関する安全評価シナリオ

閉鎖性能に関わる因子は図-1.1 に示すものである。安全評価上の核種移行経路の取り扱いについて、第2次取りまとめでの評価と今回の閉鎖性能の観点からの取り扱いの対比を表-6.1 に示す。これらの各因子の特性や機能等については、5章までに検討してきた。これらの検討に基づき閉鎖性能に関する安全評価シナリオを検討した。

シナリオの検討として、Fault ツリーを作成し、どのような条件が重なるとその移行経路が評価対象となるかを分析した。

表-6.1 閉鎖性能に関わる因子の評価の比較

	第2次取りまとめ	今検討での取り扱い
掘削影響領域	<ul style="list-style-type: none"> 坑道1本ずつの評価ではなく、断層までの距離を一律とすることで、処分場全体を1本の坑道に凝縮したことに相当する評価とした。 掘削影響領域における核種の移行は瞬時に起こるとしてバリア機能は無視している。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道1本単位での評価とする。
支保工	支保工は考慮していない。	<ul style="list-style-type: none"> 軟岩の場合、坑道沿いには数十 cm 厚さの支保工を導入する。 支保工の劣化により、透水性は増大し、連続するものとする。
破碎帯と処分パネル間の連続性	<ul style="list-style-type: none"> 処分場としては閉じた系であり、処分場から破碎帯への核種の移行は岩盤のみを通る。 	<ul style="list-style-type: none"> 処分パネル間を接続する連絡坑道が破碎帯と交差する。 破碎帯と交差する連絡坑道の前後には切欠きを持った止水プラグを設置しておく。
人工バリア	<ul style="list-style-type: none"> 評価期間を通じて健全である。 	<ul style="list-style-type: none"> 評価期間を通じて健全である。

6.1 Fault ツリー

図 6-1 は、「閉鎖性能に関連して地表への卓越的な移行が発生する」という事象について、そのシナリオ構築のための予備的な検討として、fault ツリーを展開したものである。fault ツリーの作成においては、「地表への卓越的な移行が発生する」ための条件を右方向に展開している。例えば、「地表への卓越的な移行が発生する」こと条件として、「連絡坑道を横切る破砕帯を経由する移行が発生する」あるいは「立坑経由の移行が発生する」などを列挙し、それらが一つでも生じれば「地表への卓越的な移行が発生する」と考えられることから「OR 条件」としてつなぐ。次に、本報で検討の対象とする「連絡坑道を横切る破砕帯を経由する移行が発生する」に関して、その発生条件として、「処分坑道 主要坑道 連絡坑道を通過する移行の発生」「地表までの卓越的な移行経路となる破砕帯を通過する移行の発生」を列挙し、それらが全て生じた場合にのみ「連絡坑道を横切る破砕帯を経由する移行が発生する」と考えられることから「AND 条件」としてつなぐ。同様なルールで、「連絡坑道を横切る破砕帯を経由する移行の発生」につながる条件を右方向に「OR 条件」あるいは「AND 条件」として展開した。また、ここではそれぞれの箱をダイアグラムと呼ぶこととする。

ここで、fault ツリーは、原子力発電所の事故時のリスク評価などによく用いられる手法であり、放射性廃棄物の処分のシナリオ解析においてもいくつかの適用例がある(OECD/NEA, 1992)。しかしながら、放射性廃棄物の処分のシナリオ解析において現在最もよく用いられている手法は、廃棄物の処分に関わる FEP(Features, Events, Processes)を網羅的に整理し、それら FEP の相関を図化することによりシナリオを構築していくものである(例えば、PID(Process Influence Diagram))。本年度に PID 等ではなく fault ツリーによる検討を行った理由は、「閉鎖性能に関連して地表への卓越的な移行が発生する」という事象については、

- ・ 廃棄物処分に関する全ての FEP を考える場合に比べて対象となる FEP の数が少ないこと
- ・ FEP 間のくり返しやフィードバックがあまり重要にならないこと
- ・ 最終的に知りたいことは「閉鎖性能に関連して地表への卓越的な移行が発生するか否か」であり、目標が明確であること

から、複雑な PID 等を適用しなくとも、比較的単純な fault ツリーでの検討により、シナリオ構築上のクリティカルなダイアグラムの明確化が可能であると考えたからである。このような fault ツリーの各ダイアグラムに対して、各閉鎖要素の研究開発の現状や懸案事項を対比させることにより、現段階で評価から除外できるダイアグラムと除外できないダイアグラムを整理することができる。除外できないダイアグラムにより「地表への卓越的な移行の発生」に至るルートが構築され得る場合、それが現段階での可能性のあるシナリオとなる。このような除外できないシナリオについて、さらにクリティカルなダイアグラムが何であるかを洗い出し、それを今後の研究開発につなげることにより、閉鎖性能に関する研究開発および議論を効率的に進めることができると考える。

図-6.1 の fault ツリーでは、「処分坑道 主要坑道 連絡坑道を通過する移行の発生」となる条件として、「処分坑道 主要坑道 連絡坑道沿いの連続的な移行の発生」および「止水プラグの機能喪失・劣化」をあげた。両者は、同時に起こる場合の結果として「処分坑道 主要坑道 連絡坑道を通過する移行の発生」となることから「AND 条件」となる。「処分坑道 主要坑道 連絡坑道沿いの連続的な移行の発生」は、さらに 3 つのダイアグラム「掘削影

響領域」「支保工」「埋め戻し材」における「処分坑道 主要坑道 連絡坑道を通過する移行の発生」に枝分かれし、このダイアグラムはいずれかが存在しても連続的な移行の発生になると考えられることから「OR 条件」となる。さらに、この個々のダイアグラムの発生は、「構造内での連続性」「構造間での連続性」「そこでの地下水流動の存在」が同時に発生する場合に起こるものとして「AND 条件」のダイアグラムが並ぶ。支保工についての構造間の連続性に関しては、さらに「全てが劣化する」というダイアグラムがつく。また、埋め戻し材についての構造間の連続性に関しては、埋め戻し材の機能喪失があげられ、これは、「劣化・変質」「初期欠陥」「施工不良」のいずれかが起こることによるものとして、「OR 条件」でダイアグラムが並ぶ。

一方、「止水プラグの機能喪失・劣化」の条件は「劣化・変質」「初期欠陥」「施工不良」のいずれかが起こることによるものとして「OR 条件」でダイアグラムが並ぶ。

「連絡坑道を横切る破砕帯を経由する移行が発生する」の発生条件のもう一つである「地表までの卓越的な移行経路となる破砕帯を通過する移行の発生」は、「処分場内での破砕帯の存在」「高透水特性」「破砕帯内の動水勾配」が同時に発生する場合起こるものとして「AND 条件」のダイアグラムが並ぶ。ここで、「処分場内での破砕帯の存在」は「予定地での設計裕度のない」ことが条件となる。さらに、「破砕帯内の動水勾配」の発生は「高地下水圧の存在」「流動構造の存在」のいずれかが起こることによるものとして、「OR 条件」でダイアグラムが並ぶ。

以上のようにして、図-6.1 に示す fault ツリーを構築した。

表 6-2 に、3 章～5 章で整理した各閉鎖要素の研究開発の現状や懸案事項を対比させることにより、fault ツリーで列挙した全てのダイアグラムについて現段階で評価から除外できるダイアグラムと除外できないダイアグラムを整理した結果を示す。

評価の区分けは、データに基づいて検討対象から除外できないと判断されたもの()、データがないため、現段階では検討対象から除外できないと判断されたもの()、品質保証・施工で回避できると判断されたもの(×)の3項目である。

×と判断したものは、埋め戻し材に関わるダイアグラムおよび止水プラグに関わるダイアグラムである。そのほかのダイアグラムに関しては、検討対象から除外できない結果となった。

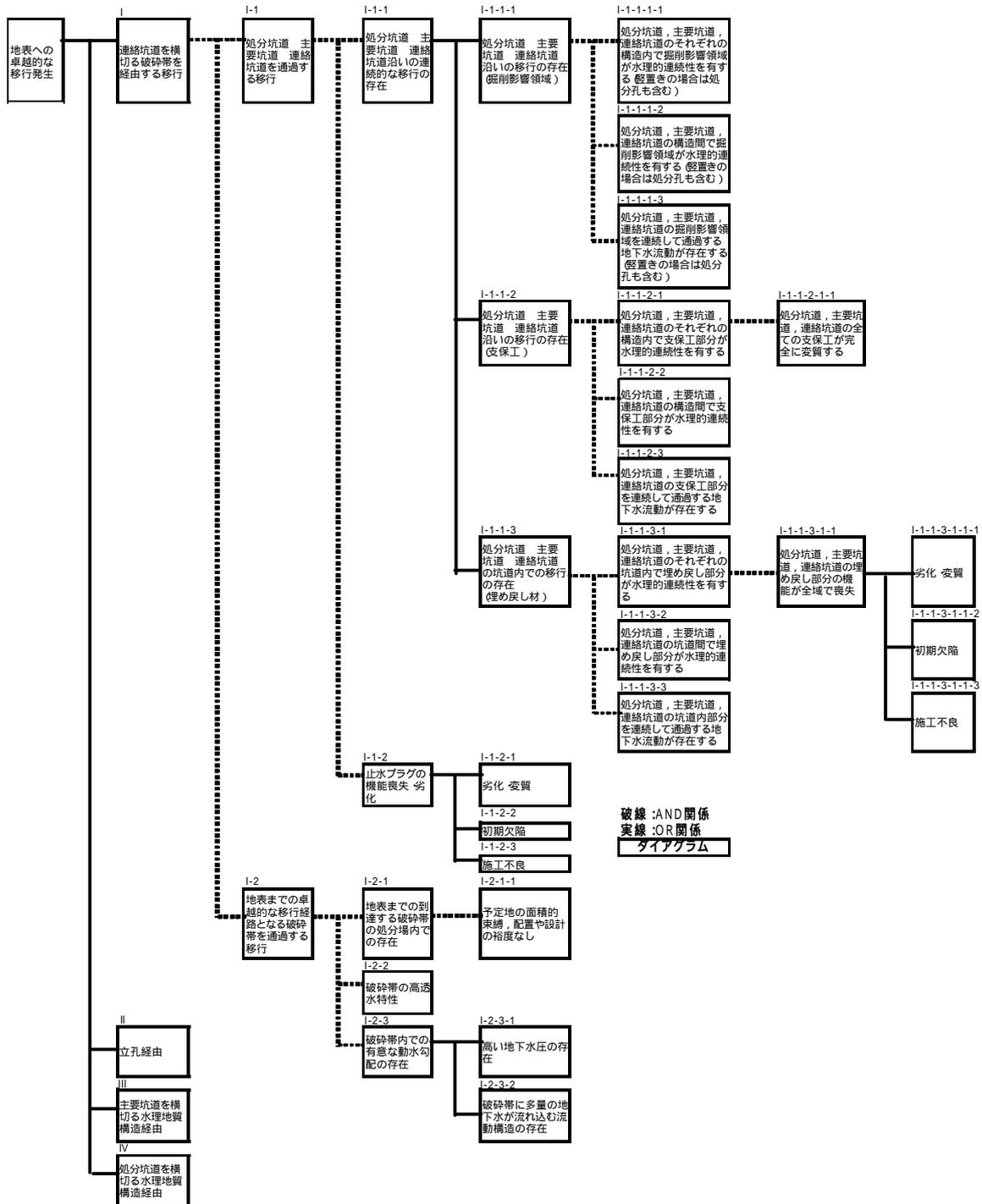


図-6.1 閉鎖性能に関わる fault ツリー

表-6.2 Fault ツリーダイアグラムの評価結果

ダイアグラム番号	現状	評価判断*
I-1-1-1-1	連続性がないことを保証できるデータはない。	
I-1-1-1-2	連続性がないことを保証できるデータはない。	
I-1-1-1-3	地下水流動がないことを保証できるデータはない。	
I-1-1-1	掘削影響領域は移行経路になると判断する。	
I-1-1-2-1-1	すべての支保が変質するとすることが妥当。	
I-1-1-2-1	変質により連続するとすることが妥当。	
I-1-1-2-2	変質により連続するとすることが妥当。	
I-1-1-2-3	地下水流動があるとすることが妥当。	
I-1-1-2	支保は移行経路になると判断する。	
I-1-1-3-1-1-1	支保の影響を考慮したベントナイト量を考慮する。 低アルカリ性コンクリートを採用する。	×
I-1-1-3-1-1-2	品質管理でカバーできる。	×
I-1-1-3-1-1-3	品質管理でカバーできる。	×
I-1-1-3-1-1	全域での機能の喪失はない。	×
I-1-1-3-1	水理的連続性はない。	×
I-1-1-3-2	低透水性は確保される。	×
I-1-1-3-3	連続した地下水流動は存在しない。	×
I-1-1-3	埋め戻し材は移行経路にならない。	×
I-1-1	掘削影響領域，支保の存在により考慮する。	
I-1-2-1	劣化を考慮したベントナイト量を考慮する。 低アルカリ性コンクリートを採用する。	×
I-1-2-2	品質管理でカバーできる。	×
I-1-2-3	品質管理でカバーできる。	×
I-1-2	止水プラグは移行経路にならない。	×
I-1	止水プラグが機能すれば移行経路にならない。	×
I-2-1-1	候補地により裕度がない場合もある。	
I-2-1	大規模断層が存在する可能性はある。	
I-2-2	断層に伴う割れ目帯が高透水性であるというデータもある。	
I-2-3	動水勾配に関する研究事例はない。	
I-2	大規模断層は移行経路になると判断する。	

* : データに基づいて検討対象から除外できないと判断されたもの
データがないため，現段階では検討対象から除外できないと判断されたもの。

× 品質保証・施工で回避できると判断されたもの。

6.2 安全評価に関する閉鎖シナリオ

本検討では、連絡坑道からそれを横切る破砕帯を経由するケースについて、これまでの検討結果に基づき、閉鎖シナリオの第1次案を構築した。図-6.1のfaultツリーと表-6.2の評価結果に基づき、整理した結果を図-6.2に示す。ダイアグラムの内、表-6.2において評価判断が×となったところは、移行経路としての可能性について検討対象から除外できるものとして、そのダイアグラムを着色した。

「埋め戻し材」における坑道内での移行の発生は検討対象から除外できるが、ほかの「掘削影響領域」および「支保工」における移行の発生は検討対象として除外できない。また、この系列はORでの関係のため、上位の「坑道沿いの連続的な移行の存在」の発生は除外することはできない。その上位の移行の発生に関しては、「AND条件」である「止水プラグ」に関するダイアグラムが検討対象から除外できることから、「処分坑道 主要坑道 連絡坑道を通過する移行の発生」は起こらないこととなる。

一方、その上位の条件のもう一つである「地表までの卓越的な移行経路となる破砕帯を通過する移行の発生」は検討対象として除外することができない。

「AND/OR条件」の関係から、止水プラグが機能することで、今回の検討ケースでの移行経路は発生しない結果となった。

しかしながら、今回検討対象から除外できなかったほかのダイアグラムに関しても除外する十分なデータがないことに起因するものも多く、移行経路となるためには破砕帯内における移行の存在および坑道沿いの連続的な移行の存在等、いくつもの条件が同時に発生することが必要であり、実際にはその発生の可能性は低いものと考えられる。

以上のことから、支保工の劣化の影響が定量的に評価できるとすると、埋め戻し材、止水プラグがその設計要件を満足して施工されることにより、安全評価上も連絡坑道を移行経路としないというシナリオが現在の知見では最も現実的であると結論付ける。

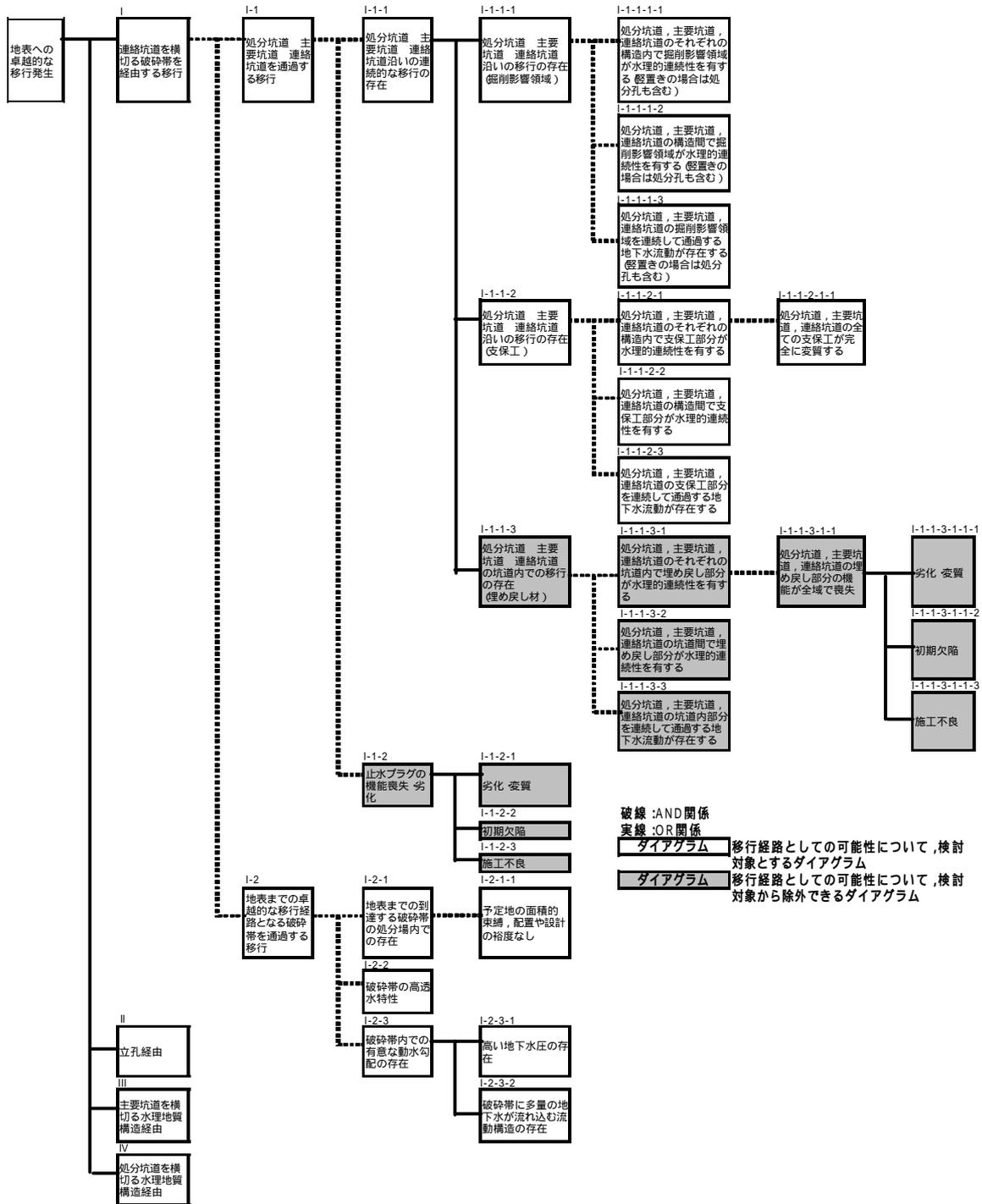


図-6.2 閉鎖シナリオ構築のための fault ツリーの分析結果

7. 今後の検討課題

図-6.2 で示したように、閉鎖シナリオで考えられる fault ツリーの分析では、検討対象から除外できたのはわずかに「埋め戻し材」および「止水プラグ」である。一方で、今回検討対象から除外できなかったものは、十分なデータがないために移行の存在を否定できず検討に加えていると同時に、必ずその現象が発生するためにはいくつもの条件が重なった場合というかなり可能性が低いものもある。

2 章でも述べたが、解析評価と実際の工学技術のギャップの定量的な評価に加え、地質環境（たとえば、坑道沿いの掘削影響領域の水理的な連続性）に関しても、評価と調査のギャップに関して定量的な評価を行い、そのギャップを埋めていくことが必要である。

今回は第 1 段階として閉鎖シナリオの構築を試みたが、今後は、今回のシナリオで Key となった因子（埋め戻し材および止水プラグ）について、長期性能の保守性に関するデータの取得が重要になると考えられる。たとえば、止水プラグ、埋め戻し材ともベントナイト混合材料ということでは緩衝材と同じ材料であることから、緩衝材の長期挙動に関するデータおよび評価手法を止水プラグの評価にも取り込んでいく必要がある。支保工の劣化に関しては、TRU 廃棄物処分研究での変質・劣化挙動の研究成果を取り入れていくことが必要である。

また、掘削影響領域の水理挙動等、坑道規模の挙動に関しては、原位置での試験により定量的な評価を行う必要がある。原位置での試験が必要なものに関しては、幌延等の地下研究施設を利用したデータの取得が必要であると考えられる。

一方、シナリオそのものに関しても、今回の検討から除外しているが、立坑を経由するケース、主要坑道からそれを横切る破砕帯を経由するケース、処分坑道からそれを横切る破砕帯を経由するケース、地表から地下深部に打たれたボーリング孔を経由するケース等についても、今回実施したシナリオの分析を行い、閉鎖シナリオへの影響について検討が必要である。

8. おわりに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における地下施設の閉鎖技術に関して、処分場の閉鎖で要となる部分は何か、について処分技術および安全評価の観点から検討し、そこにおける安全評価をどう考えるべきかについて検討することとした。

平成 14 年度はその検討の第一段階として、閉鎖性能にかかわる因子の特性についての理解度を整理するとともに、閉鎖シナリオの構築を試みた。核種の地表への移行経路を考えた場合、考えられる経路は母岩をとおり破碎帯にいたるケースが基本であるが、各因子の閉鎖能力が十分でなかった場合には、連絡坑道からそれを横切る破碎帯を経由するケース、立坑を経由するケース、主要坑道からそれを横切る破碎帯を経由するケース、処分坑道からそれを横切る破碎帯を経由するケース、地表から地下深部に打たれたボーリング孔を経由するケース等が考えられる。本報告書では、これら考えられるケースの中から、各因子の閉鎖能力が十分でなかった場合として、連絡坑道からそれを横切る破碎帯を経由するケースを対象とした検討を行った。

連絡坑道からそれを横切る破碎帯を経由するケースで処分パネル-破碎帯間の閉鎖性能に影響を与える因子は、坑道周辺岩盤（掘削影響領域を含む）における連続的な移行経路の発現、破碎帯の連絡坑道との交差、コンクリート支保工の設置された坑道における支保工の劣化による連続的な移行経路の発現、坑道を埋め戻す埋め戻し材の止水性能、止水プラグの止水性能である。

まず、これらの因子の特性についての理解度を整理し、引き続き破碎帯と処分パネル間の水理解析、fault ツリー解析等の検討を行い、第 1 次案としての閉鎖性能シナリオを構築した。

検討の結果、支保工の劣化の影響が定量的に評価できるとすると、埋め戻し材、止水プラグがその設計要件を満足して施工されることにより、安全評価上も連絡坑道を移行経路としないというシナリオが現在の知見では最も現実的であると結論付けた。

謝辞

本検討において、検討を進める上で、処分バリア性能研究グループの伊藤彰氏、検査開発(株)の鈴木英明氏、酒井裕一氏に貴重な意見をいただいた。また、水理解析の実施にあたり検査開発(株)の坂本和彦氏にご協力いただいた。ここに記して感謝の意を示す。

参考文献

Börgesson, L.: “Äspö Hard Rock Laboratory Test Plan for Backfill and Plug Test”, SKB Progress Report HRL-98-08 (1997)

Chandler, N., Dixon, D., Gray, M., Hara, K., Cournut, A. and Tillerson, J.: “An in situ Demonstration of Technologies for Vault Sealing”, Proc. 19th Annual Conference of Canadian Nuclear Society (1998)

Chandler, N., Cournut, A., Dixon, D., Fairhurst, C., Hansen, F., Gray, M., Hara, K., Ishijima, Y., Kozak, E., Martino, J., Masumoto, K., McCrank, G., Sugita, Y., Thompson, P., Tillerson, J. and Vignal, B.: “The five years report of the Tunnel Sealing Experiment: an international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP”, Atomic Energy of Canada Limited Report AECL-12727 (2001)

Dahlström, L.-O.: “Äspö Hard Rock Laboratory Test Plan for the Prototype Repository”, SKB Progress Report HRL-98-24 (1998)

Davison, C.C., Kozak, E.T., Frost, L.H., Ewritt, R.A., Brown, A., Gascoyne, M. and Scheier, N.W.: “Characterizing and modeling the radionuclide transport properties of fracture zones in plutonic rocks of the Canadian shield”, Water-conducting Features in Radionuclide Migration, The third GEOTRAP Workshop, OECD/NEA, Barcelona, Spain, pp.97-114 (1998)

Dereeper, D. and Volckaert, G.: “The RESEAL Project: A Large Scale In-situ Demonstration Test for Repository Sealing in an Argillaceous Host Rock”, Backfilling in Radioactive Waste Disposal, 6th International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002)

古市光昭，奥津一夫，平和男，原啓二：“高レベル放射性廃棄物処分場の埋戻しの検討”，原子力バックエンド研究，vol.5, No.1, pp.51-58 (1998)

Goudarzi, R., Gunnarsson, D., Johannesson, L.-E. and Börgesson, L.: “Äspö Hard Rock Laboratory Backfill and Plug Test Sensors Data Report (period 990601-020701) Report No.5”, SKB International Progress Report IPR-02-54 (2002)

Goudarzi, R. and Börgesson, L.: “Äspö Hard Rock Laboratory Prototype Repository Sensors Data Report (period 010917-020901) Report NR.3”, SKB International Progress Report IPR-02-61 (2002)

Gray, M. and Shenton, B.: "For better concrete, take out some of the cement", 6th ACI/CANMET Symposium on the durability of concrete, Bangkok, Thailand (1998)

井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃: "我が国の岩盤の水理特性について", サイクル機構技術資料 JNC TN8400 99-090 (1999)

井上大榮, 水落幸広, 桜田裕之: "リニアメントの断裂系としての特性とその評価", 応用地質 33 巻, 3 号, pp.147-156 (1992)

核燃料サイクル開発機構: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊 2 地層処分の工学技術", サイクル機構技術資料 JNC TN1400 99-022 (1999a)

核燃料サイクル開発機構: "わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊 3 地層処分システムの安全評価", サイクル機構技術資料 JNC TN1400 99-023 (1999b)

Komine, H., Ogata, N., Horie, Y., Ishii, T. and Nishio, S.: "Permeability and mechanical properties of bentonite-sand mixture for sealing LLW repositories", Transactions of the 11th international conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, vol. SD1, pp.271-276 (1991)

日本コンクリート工学協会編: コンクリート便覧(第二版), 技報堂出版株式会社(1996)

OECD/NEA: "Systematic Approaches to Scenario Development", A report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal, Paris (1992)

緒方正彦・本荘静光: "電力施設の耐震設計における断層活動性の評価", 応用地質 22 巻, 1 号, pp.67-87 (1981)

ONDRAF/NIRAS: "Backfilling in Radioactive Waste Disposal", 6th International Workshop on Design and Construction of Final Repositories, Brussels, March 2002 (2002)

大野博之・小島圭二: "岩盤割れ目のフラクタル(その1)", 応用地質 33 巻, 3 号, pp.133-146 (1992)

大野博之・小島圭二: "岩盤割れ目のフラクタル(その2)", 応用地質 34 巻, 2 号, pp.58-72. (1993)

大和田仁，三原守弘，入矢桂史郎，松井淳：“放射性廃棄物地層処分システムにおけるセメント系材料の検討 - 浸出液の pH を低くしたセメント系材料の施工性と機械的特性 - ”，JNC TN8400 99-057 (2003)

Pusch, R.:“Backfilling with Mixtures of Bentonite/Ballast Materials or Natural Smectitic Clay?”, SKB TR-98-16 (1998)

SKB : “Backfill Requirements in KBS-type repository -A POSIVA/SKB Workshop”, SKB IPR-02-05 (2002)

澤田淳，井尻裕二，大西有三，大津宏康，西山哲：“亀裂トレース長のスケール依存性を考慮した検討”，第 11 回岩の力学国内シンポジウム，A04 (2002)

Sawada, A., Ohnishi, Y., Ohtsu, H. and Nishiyama, S: “Applicability of the concept of fractal to fracture network model in rock mass”, Rock Engineering problems and approaches in underground construction, Choi, Ryu, Jeon & Moon (eds), vol.1, pp.203-210 (2002)

杉田裕，藤田朝雄，棚井憲治，古市光昭，奥津一夫，三浦一彦：“地層処分における地下施設の埋め戻し”，サイクル機構技術資料 JNC TN8400 99-040 (1999)

杉田裕，升元一彦：“トンネルシーリング性能試験におけるプラグの設計・施工技術”，サイクル機構技術資料 JNC TN8400 2002-005 (2002)

棚井憲治，岩佐健吾，長谷川宏，郷家光男，堀田政國，納多勝：“地層処分場のレイアウトに関する検討”，サイクル機構技術資料 JNC TN8400 99-044 (1999)

田中和広，井上大栄：“断層の定義，考え方”，土と基礎，第 43 巻 3 号，pp.11-14 (1995)

米田茂夫，小屋開地稔：“地盤の透水性に関する文献調査 (その 2)”，PNC TJ7308 93-005，vol.1 (1993)